

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

Unterventilierte Realbrände

Experimentelle Untersuchungen zu Wohnungsbränden bei Luftmangel

von

M. Sc. Korbinian Zeh

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

B. Sc. Paul Weiser

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik



213

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 213

Unterventilierte Realbrände

Experimentelle Untersuchungen zu Wohnungsbränden bei
Luftmangel

von

M. Sc. Korbinian Zeh

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

B. Sc. Paul Weiser

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

September 2022

FA. Nr. 252 (2/2021)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 213	Titel des Berichtes: Unterventilierte Realbrände - Experimentelle Untersuchungen zu Wohnungsbränden bei Luftmangel		ISSN: ISSN 0170-0060
Autor: M. Sc. Korbinian Zeh Dr.-Ing. Ilian Dinkov B. Sc. Paul Weiser		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 252 (2/2021)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: September 2022			
Seitenzahl: 91	Bilder: 118	Tabellen: 12	Literaturverweise: 39
Kurzfassung: <p>Im vorliegenden Forschungsbericht wurde der Einfluss von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen auf einen Brand untersucht. Hauptfragestellungen waren dabei neben der Änderung des Brandregimes (ventiliert - unterventiliert) auch die Abhängigkeit ausgewählter Schadstoffemissionen, sowie die Sauerstoffgrenzwerte und Temperaturen von dem über die Belüftung gelenkten Brandverlauf. Es wurden vier Realbrandversuche durchgeführt. Bei den ersten zwei Versuchen war eine Ventilationsöffnung vorhanden. Der dritte Versuch wurde ohne Ventilationsöffnung durchgeführt. Im vierten Versuch wurden die Ventilationsbedingungen während des Ablaufs verändert. Die Brandversuche wurden in einem 25 m² großen und 2,70 m hohen Brandraum vorgenommen. Die Tür blieb bei allen Versuchen geschlossen, nur die Fensteröffnung (1,0 m x 1,0 m) diente zur Einstellung der Ventilationsbedingungen. Für die Versuche wurde der Raum in Nachbildung eines Kinderzimmers eingerichtet. Um den Einfluss der Ventilationsbedingungen zu beurteilen, wurden die wichtigsten Brandkenngößen (Temperatur, Druck und ausgewählte Gase (O₂, CO₂, CO, Ges.-C, HCN)) während jedes Versuchs gemessen.</p> <p>Die Ergebnisse der vier Brandversuche sowie die umfassende Videodokumentation (Videoaufnahmen im Brandraum) lieferten wichtige Erkenntnisse über die auftretenden Phänomene bei einer Änderung des Brandregimes. Die durchgeführten Brandversuche zeigten eine klare Abhängigkeit wichtiger Brandparameter wie Temperatur, Druck, Sauerstoff- und Schadstoffkonzentrationen von den Ventilationsbedingungen. Wichtig bei Wohnungsbränden zum Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr ist die Abgastemperatur (bzw. das Erreichen der Rauchgaszündtemperatur). Davon hängt ab, ob eine direkte Rauchgasdurchzündung (oder ein Backdraft) sowie nachfolgend ein Flashover stattfindet.</p>			
Schlagwörter: unterventilierte Brände, Brandversuche, Flashover, Rauchgasdurchzündung			

Inhaltsverzeichnis

Berichtskennblatt	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Literaturrecherche	3
2.1 Untersuchung von Augustin	3
2.2 Untersuchung von Brein und Kunkelmann	3
2.3 Untersuchung von Knaust	5
2.4 Untersuchung von Kaudelka	5
2.5 Untersuchung von Coppalle, Garo et al.....	6
2.6 Untersuchung von Bellivier, Guillaume et al.....	6
2.7 Untersuchung von Gojkovic.....	7
2.8 Untersuchung von Basmer und Zwick	8
2.9 Fazit der Literaturrecherche	10
3 Grundlagen	11
3.1 Der Brand	11
3.2 Einflussgrößen.....	12
3.3 Brandkenngrößen.....	13
3.4 Brandverlauf bei Raumbränden.....	14
3.5 Brandstoffe	18
4 Versuchsaufbau und Messtechnik	27
5 Ergebnisse Raumbrandversuche	35
5.1 Versuch 1	35
5.2 Vergleich zwischen Versuch 1 und 2.....	53
5.3 Versuch 3	61
5.4 Versuch 4	71
6 Zusammenfassung und Ausblick	87

Literaturverzeichnis..... 92

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken.
Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle
für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Offener Brandraum vor der Zündung [4].....	4
Abbildung 2: Zeitlicher Temperaturverlauf bei Wohnzimmerbrandversuch mit einer geöffneten Raumwand. Der Zeitpunkt des Flashovers ist mit t_{FI-ov} gekennzeichnet. Die Schwankungen der Massenmessung resultieren aus den Löscharbeiten. [4].....	5
Abbildung 3: Zimmer vor dem Brandversuch [6].....	7
Abbildung 4: Brandkammer für Pyrolyseuntersuchungen [8].....	9
Abbildung 5: Möbliertes Zimmer vor dem Versuch [8].....	9
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wärme- und Stoffströme sowie deren Mechanismen für den Abbrand eines flüssigen Brennstoffes [10]......	11
Abbildung 7: Einflussgrößen auf einen Brand [14] zitiert nach [10]	13
Abbildung 8: Charakteristischer Verlauf eines Zimmerbrandes bei vorhandener Zuluftöffnung [21] zitiert nach [18]	15
Abbildung 9: Brandverlauf eines Zimmerbrandes ohne Zuluftöffnung und Entstehung eines Backdrafts [21]; zitiert nach [18].....	17
Abbildung 10: Schnitt durch zwei verschiedene Arten moderner Möbelstrukturen [1]	18
Abbildung 11: Schnitt im Detail eines modernen Möbelstücks mit Wabenstruktur [1]18	
Abbildung 12: Vergleich von spanplatten- und massivholzbasierten Möbeln in Bezug auf die Wärmefreisetzungsrates [1].....	19
Abbildung 13: Abgasemissionen [1]	19
Abbildung 14: HCN-Konzentrationen im Schwelbrandbereich von ausgesuchten Möbelstücken [1]	20
Abbildung 15: Temperatur- und Konzentrationsverläufe für eine Methan-Luft-Vormischflamme [30].....	22
Abbildung 16: NO-Recycling [34].....	25
Abbildung 17: Grundriss des Brandraums (Eigene Darstellung, 2021)	28
Abbildung 18: 3D-Modell des möblierten Brandraums (Eigene Darstellung, 2021)..	29
Abbildung 19: Foto des möblierten Brandraums (Eigene Darstellung, 2021).....	29
Abbildung 20: Standorte der Messstellen (Eigene Darstellung, 2021).....	30
Abbildung 21: Schnitt durch bidirektionale Sonde mit Überdruck- und Unterdruckseite sowie den zum Differenzdruckmesser führenden Rohren [39].	32
Abbildung 22: Löschanlage (CALLIES, ohne Datum).....	33
Abbildung 23: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	36

Abbildung 24: Brandraumfenster nach 1:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	36
Abbildung 25: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	36
Abbildung 26: Brandraumfenster nach 2:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	36
Abbildung 27: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	37
Abbildung 28: Brandraumfenster nach 2:30 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	37
Abbildung 29: Brandraum nach ca. 5 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)....	37
Abbildung 30: Brandraumfenster nach ca. 5 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	37
Abbildung 31: Brandraum nach 7:20 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	38
Abbildung 32: Brandraum nach 7:20 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	38
Abbildung 33: Brandraum nach Versuch 1 (Eigene Darstellung, 2022).....	38
Abbildung 34: Thermokette 4 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	39
Abbildung 35: Temperaturverlauf TK 1 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	40
Abbildung 36: Temperaturverlauf TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	40
Abbildung 37: Temperaturverlauf TK 3 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	41
Abbildung 38: Druckverlauf im Raum geglättet (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	43
Abbildung 39: Brandraumwaage und mittlerer Temperaturverlauf von TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	44
Abbildung 40: Temperaturverlauf der im Fenster positionierten Thermoelemente TF1 (untere Fensterhälfte), TF2 (mittig) und TF3 (obere Fensterhälfte) (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	45
Abbildung 41: Druckverlauf im Fenster geglättet (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	47
Abbildung 42: Gasgeschwindigkeiten in Ventilationsöffnung (Fenster) oben und unten und mittlere Temperatur von TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	48
Abbildung 43: Sonde oben CO und Ges.-C (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022). 49	
Abbildung 44: Sonde oben O ₂ und CO ₂ (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	50
Abbildung 45: Sonde unten O ₂ und CO ₂ (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)	51
Abbildung 46: Sonde unten CO (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022).....	52

Abbildung 47: Vergleich Temperatur TK 1 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	53
Abbildung 48: Vergleich Temperatur TK 2 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	54
Abbildung 49: Vergleich Temperatur TK 3 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	54
Abbildung 50: Vergleich Temperatur TK 4 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	55
Abbildung 51: Vergleich O2-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	56
Abbildung 52: Vergleich CO2-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	56
Abbildung 53: Vergleich CO-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	57
Abbildung 54: Vergleich Ges.-C Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	57
Abbildung 55: Druckverlauf im Raum (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	58
Abbildung 56: Vergleich der Brandraumwaage in Versuch 1 und Versuch 2 (Eigene Darstellung, 2022)	59
Abbildung 57: Geglättete Druckverläufe im Fenster (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)	60
Abbildung 58: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	62
Abbildung 59: Brandraum nach 1:50 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	63
Abbildung 60: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	63
Abbildung 61: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	63
Abbildung 62: Brandraum nach 8:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	64
Abbildung 63: Brandraum nach 18:45 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021) ..	64
Abbildung 64: Brandraum nach 19:30 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022) ..	64
Abbildung 65: Brandraum nach 41:36 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021) ..	65
Abbildung 66: Brandraum nach 46:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021) ..	65
Abbildung 67: Brandraum nach 1:09 h (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	65
Abbildung 68: Brandraum nach dem Versuch (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)	66
Abbildung 69: Thermokette 4 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	66

Abbildung 70: Thermokette 1 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	67
Abbildung 71: Thermokette 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	67
Abbildung 72: Thermokette 3 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	67
Abbildung 73: Sonde unten O ₂ und CO ₂ (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	68
Abbildung 74: Sonde unten (CO) und oben (Ges.-C) (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)	68
Abbildung 75: Brandraumwaage und mittlerer Temperaturverlauf von TK 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022).....	70
Abbildung 76: Druckverlauf Versuch 3 mit mittlerer Temperatur von TK 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022).....	71
Abbildung 77: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	72
Abbildung 78: Brandraumfenster nach 1:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	72
Abbildung 79: Brandraum nach 1:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	72
Abbildung 80: Brandraumfenster nach 1:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	72
Abbildung 81: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	73
Abbildung 82: Brandraumfenster nach 2:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	73
Abbildung 83: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	73
Abbildung 84: Brandraumfenster nach 2:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	73
Abbildung 85: Brandraum nach 5:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	74
Abbildung 86: Brandraumfenster nach 5:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	74
Abbildung 87: Brandraum nach 7:40 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	74
Abbildung 88: Brandraumfenster nach 7:40 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	74
Abbildung 89: Brandraum nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022) ..	75
Abbildung 90: Brandraumfenster nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	75
Abbildung 91: Brandraumfenster frontal nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	75
Abbildung 92: Brandraum nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022) ..	76

Abbildung 93: Brandraumfenster nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	76
Abbildung 94: Brandraumfenster frontal nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	76
Abbildung 95: Brandraum nach 15:15 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022) ..	76
Abbildung 96: Brandraumfenster frontal nach 15:15 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	76
Abbildung 97: Brandraum nach 18:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022) ..	77
Abbildung 98: Brandraumfenster nach 18:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	77
Abbildung 99: Brandraum nach 20:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022) ..	77
Abbildung 100: Brandraumfenster nach 20:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	77
Abbildung 101: Brandraum nach 22:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	78
Abbildung 102: Brandraumfenster nach 22:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	78
Abbildung 103: Brandraum nach 25:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	78
Abbildung 104: Brandraumfenster nach 25:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	78
Abbildung 105: Brandraum nach 26:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	79
Abbildung 106: Brandraumfenster nach 26:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	79
Abbildung 107: Brandraum nach 28:05 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	79
Abbildung 108: Brandraumfenster nach 28:05 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	79
Abbildung 109: Brandraum nach 30:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	80
Abbildung 110: Brandraumfenster nach 30:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	80
Abbildung 111: Temperaturverlauf TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022).....	81
Abbildung 112: Temperaturverlauf TK 3 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022).....	81
Abbildung 113: Druckverlauf (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	82
Abbildung 114: Sonde oben O2, CO2 und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	83

Abbildung 115: Sonde oben CO, Ges.- C und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	84
Abbildung 116: Sonde unten O2, CO2 und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	85
Abbildung 117: Sonde unten CO, Ges.-C und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)	85
Abbildung 118: Vergleich der mittleren Temperatur (TK2) beim Versuch 1, 3 und 4	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maximale Konzentrationswerte der Pyrolyse- und Brandversuche von Basmer und Zwick [8].	9
Tabelle 2: Auswahl brennbarer Brandgase [16]; [17] zitiert nach [18], [19], [20].	14
Tabelle 3: Letale CO-Dosis nach verschiedenen Expositionszeiten [16]; zitiert nach [18])	22
Tabelle 4: Auflistung der Einrichtungsgegenstände (Eigene Darstellung, 2021)	28
Tabelle 5: Aufzählung der Messstellen (Eigene Darstellung, 2021)	30
Tabelle 6: Höhe der Thermoelemente der Thermoketten (Eigene Darstellung, 2021)	30
Tabelle 7: Zeitliche Brandverlaufsdarstellung Versuch 1	35
Tabelle 8: Maximaltemperaturen der Mittelwerte (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2021)	55
Tabelle 9: Zeitliche Brandverlaufsdarstellung Versuch 3	61
Tabelle 10: Optische Brandverlaufsdarstellung anhand von Kameraaufnahmen innerhalb des Raums in Versuch 3	62
Tabelle 11: Optische Brandverlaufsdarstellung anhand von Kameraaufnahmen innerhalb und außerhalb des Raums in Versuch 4	72
Tabelle 12: Maximalwerte der wichtigsten Brandparameter	90

1 Einleitung

Für die Dynamik eines Zimmerbrandes ist neben der Brandlast die zur Verfügung stehende Verbrennungsluft von großem Einfluss. Wohnungsbrände können zum Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr bereits erloschen sein. Allerdings kann es unter ungünstigen Bedingungen zum Phänomen einer Rauchgasdurchzündung kommen. Hierbei entzünden sich große Mengen an Pyrolysegasen bei ausreichender Zuführung von Luft schlagartig, wobei die vollständige Verbrennung und Brandausbreitung durch Luftmangel zuvor gehemmt wurde. Unfälle, bei denen Rauchgasdurchzündungen zu schweren Unfällen bei Feuerwehreinsätzen führten, sind zahlreich dokumentiert. In den vergangenen Jahren wurden bereits zahlreiche Untersuchungen zum Einfluss der über die Jahrzehnte veränderten Brandlast, also des Mobiliars, durchgeführt, u.a. auch an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (s. IMK-Bericht 203). Die ehemals von Massivholzmöbeln dominierte Einrichtung hat sich in Richtung Möbel mit hohem Spanplatten- und Kunststoffanteil (moderne Möbel) gewandelt. Untersuchungen haben gezeigt, dass moderne Möbel schneller zum Flammenübersprung und Vollbrand führen als Vollholzmöbel [1].

Zimmerbrände mit und ohne Ventilationsöffnungen sind in Realbrandversuchen bereits erforscht worden, ausgewählte werden hier exemplarisch vorgestellt. So wurden Raumbrandversuche von Kaudelka [2] mit der Feuerwehr Frankfurt am Main mit geöffnetem und geschlossenem Fenster sowie alten und modernen Möbeln durchgeführt und Erkenntnisse gewonnen zu den Rauchgaskonzentrationen, dem Brandverlauf sowie der einhergehenden Bildung der Rauchsicht. Coppalle, Garo et al. [3] führten Brandversuche mit Paletten in einem geschlossenen Seecontainer zur Bestimmung des Brandregimes (normal-/unterventiliert) durch. Ein genauer Sauerstoffgrenzwert konnte nicht definiert werden. Offen bleibt die Frage, unter welchen Bedingungen (Temperaturen, Sauerstoffkonzentrationen, Art des Mobiliars) es trotz Luftmangels zum Vollbrand kommt bzw. unter welchen Voraussetzungen die Selbsterlöschung eintritt. Nicht abschließend untersucht ist auch die Frage, welchen Einfluss die Ventilationsbedingungen auf die entstehenden Abgase haben.

Ziel des vorliegenden Forschungsberichts ist es, den Einfluss von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen auf einen Brand zu untersuchen. Außerdem sollen die Fragen geklärt werden, welchen Einfluss die Ventilationsbedingungen auf

ausgewählte Gase haben und unter welchen Ventilationsbedingungen der Brand erlischt.

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vier Realbrandversuche durchgeführt. Bei den ersten zwei Versuchen war eine Ventilationsöffnung vorhanden. Der dritte Versuch wurde ohne Ventilationsöffnung durchgeführt und der vierte Versuch bildete eine Kombination mit dem Ziel, eine Rauchgasdurchzündung herbeizuführen. Bei allen Versuchen wurde im Brandraum ein modernes Kinderzimmer nachgebildet. Gemessen wurden die Parameter Temperatur, Druck und ausgewählte Gase (O_2 , CO_2 , CO , Ges.-C und HCN).

Es war zu erwarten, dass die durchgeführten unterventilierten Realbrände zum einen äußerst hohe Schadstoffkonzentrationen aufweisen, darüber hinaus aber das Risiko bergen, dass bei plötzlicher Sauerstoffzufuhr bei genügend hohen Temperaturen oder bei Vorhandensein von Glutnestern o. Ä. die Pyrolysegase durchzünden. Zur Verhinderung einer Durchzündung der angesammelten Pyrolysegase stand eine Hochdruckwassernebellöschanlage zur Verfügung und wurde im ersten Brandversuch ohne Ventilationsöffnung eingesetzt.

Der vorliegende Forschungsbericht zeigt mittels einer Literaturrecherche (*Kapitel 2*) den Stand der Forschung und vorangegangene, mit der Thematik verwandte Brandversuche. Der Grundlagenteil (*Kapitel 3*) betrachtet die Verbrennung, speziell bei Raumbränden, und deren Verläufe sowie die daraus entstehenden Abgase und deren Gefährdungen. Die zur Beantwortung der offenen Fragen durchgeführten Brandversuche werden in *Kapitel 4* im Detail bezüglich der Methodik, des Aufbaus und der eingesetzten Messtechnik dargestellt. Darauf folgend werden die Versuche ausgewertet dargestellt, auf ihre Reproduzierbarkeit hin untersucht und die ausgewählten, zuvor genannten Parameter im Detail betrachtet (*Kapitel 5*). Zum Schluss wird in *Kapitel 6* eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse gegeben.

2 Literaturrecherche

In diesem Kapitel werden vergangene Untersuchungen zu den Themen Brände bei unterschiedlichen Belüftungszuständen und Brände von modernen Möbeln zusammengefasst.

2.1 Untersuchung von Augustin

Augustin [1] untersuchte das Brandverhalten unterschiedlichen Mobiliars bei einem reproduzierbaren Entstehungsbrand im Labormaßstab mit dem Ziel, Unterschiede zwischen klassischen und modernen Möbeln herauszufinden. Er kam zu dem Ergebnis, dass moderne Einrichtungsmaterialien mit verstärktem Kunststoff- oder Spanplattenanteil eine kürzere Branddauer und eine kürzere Brandentstehungsphase aufweisen. Außerdem konnten für diese Materialien höhere Massenabnahmeraten und damit auch höhere Wärmefreisetzungsraten ermittelt werden. Des Weiteren zeigten moderne Möbelmaterialien bei Schwelbränden ein größeres Gefährdungspotential bezüglich ihrer Kohlenstoffmonoxid-Emissionen als Materialien von älteren Einrichtungsgegenständen [1].

Auch die Cyanwasserstoff-Konzentrationen wurden von Augustin bei der Verschmelzung von Möbel-Materialproben untersucht. Bei einer Spanplatte konnte eine HCN-Konzentration von über 60 Vol.-ppm gemessen werden, bei Massivholz hingegen nur eine geringe Konzentration von maximal 0,5 Vol.-ppm. Bei schaumstoffhaltigen Proben wurde eine HCN-Konzentration von maximal 1 Vol.-ppm festgestellt. Bei der Verbrennung der Materialien ist jedoch ein deutlich niedriger HCN-Anteil zu erwarten, da die Verbindung in der Flamme weiterreagiert. Bei Schaumstoff zeigte sich das Problem, dass die Probe bei der Verschmelzung schmilzt und abtropft. Dies kann zu einer schnelleren Entzündung von darunterliegenden Gegenständen führen. Als der Stoff entzündet wurde, konnte eine hohe Verbrennungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Wenn eine große Menge Schaumstoff (z. B. Matratze) vorhanden ist, ist die Brandausbreitung aufgrund des leicht entflammaren Materials enorm [1].

2.2 Untersuchung von Brein und Kunkelmann

Im Forschungsbericht Nr. 154 [4] der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder (im Folgenden IMK-Bericht genannt) beschäftigten sich Brein und Kunkelmann mit feuerwehreinsatztaktischen Problemstellungen bei der

Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise. Eine zentrale Aussage des Berichts ist, dass durch die erhöhte Luftdichtheit und verbesserte Wärmedämmung die Gefahr der Entstehung eines Backdraft oder eines Rollover (siehe *Kapitel 3.4*) bei plötzlicher Luftzufuhr steigt. In einem Zimmer, in dem Fenster und Türen geschlossen sind, kann es durch mangelnde Luftzufuhr zum Erlöschen offener Flammen kommen. Ein Flashover (siehe *Kapitel 3.4*) ist in dieser Phase unwahrscheinlich [4].

In einem Realbrandversuch wurde von Kunkelmann ein Wohnzimmerbrand durchgeführt. Zur besseren Anschauung wurde hierfür eine ganze Raumwandseite entfernt, was somit nicht den realen Verhältnissen eines Zimmerbrandes entsprechen würde. Vielmehr handelt es sich um eine Konfiguration für einen gut ventilerten Raumbrand. Die typischen Phänomene eines Zimmerbrandes sind aufgetreten, jedoch mit zeitlichem Versatz. Ein unterventilierter Zustand hat sich aufgrund der besonders offenen Bauweise nicht eingestellt (siehe Abbildung 1). Der (lokale) Temperaturabfall (siehe Abbildung 2) nach dem Flashover (zum Zeitpunkt t_{FI-ov}) ist auf den erhöhten Ruß- und verringerten Sauerstoffanteil in der Rauchschiicht zurückzuführen [4].



Abbildung 1: Offener Brandraum vor der Zündung [4]

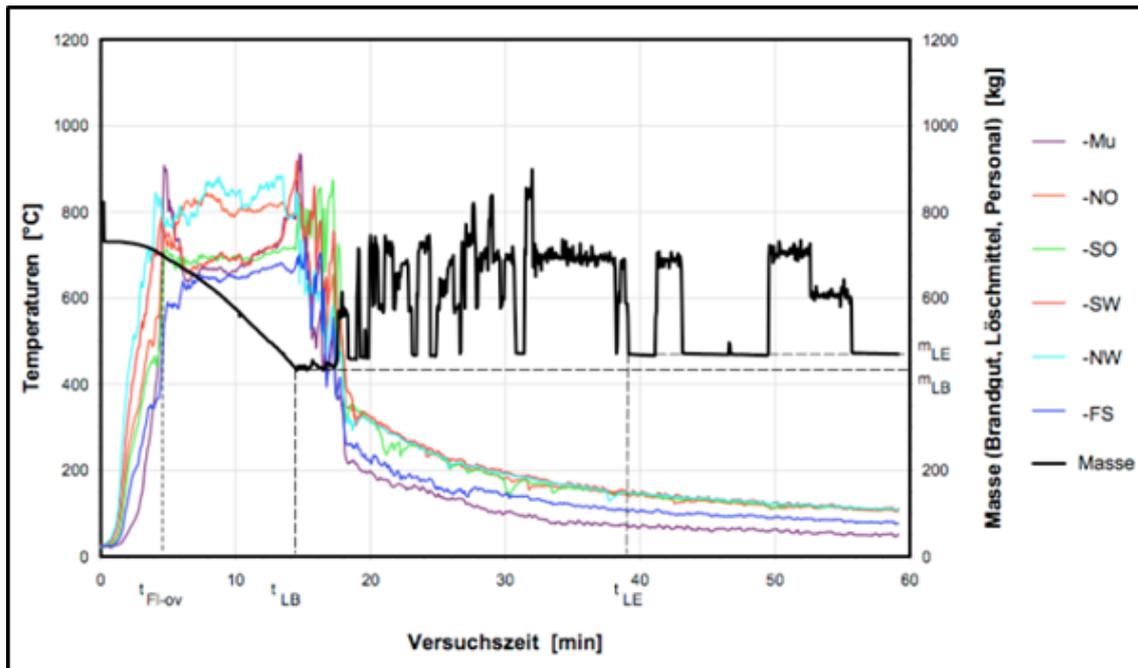


Abbildung 2: Zeitlicher Temperaturverlauf bei Wohnzimmerbrandversuch mit einer geöffneten Raumwand. Der Zeitpunkt des Flashovers ist mit t_{FI-ov} gekennzeichnet. Die Schwankungen der Massenmessung resultieren aus den Löscharbeiten. [4]

2.3 Untersuchung von Knaust

Im Rahmen einer Dissertation führte Knaust [5] einen Versuch in Zusammenarbeit mit der Berliner Feuerwehr durch. Ziel war es, den Brandverlauf in einem Kinderzimmer (5 x 2,8 m) darzustellen, um ein „Computational Fluid Dynamics“-Modell (CFD) validieren zu können. Alle Fenster und Türen im Brandraum und im Treppenhaus waren geöffnet. Im Zimmer befanden sich 224 kg Holzmöbel und 83 kg Polymergegenstände. Mit einem Teelicht wurde das Bett entzündet. Durch die hohe Brandlast im Zündungsbereich kam es zu einer schnellen Rauch- und Brandausbreitung. In der vierten Minute kam es zu einem Flashover, hierbei wurden im Bereich der Decke Temperaturen von etwa 660 °C gemessen. Nach fünf Minuten wurden an der Decke fast 1.000 °C gemessen, weshalb der Brand aus Sicherheitsgründen gelöscht wurde [5].

2.4 Untersuchung von Kaudelka

Kaudelka [2] führte in Zusammenarbeit mit der Feuerwehr Frankfurt am Main Raumbrandversuche bei geöffneten und geschlossenen Fenstern durch. Das Ziel war es, den Einfluss der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtung (alte und moderne Möbel) sowie den Einfluss der Ventilationsbedingungen auf die Brandausbreitung zu

untersuchen. Zwei 22 m² große Räume mit jeweils zwei Fenstern wurden über eine offene Tür miteinander verbunden. Der Brandraum war mit 363 kg Möbeln ausgestattet. Die Ergebnisse der Brandversuche bei geschlossenen Fenstern zeigten, dass es nach 300 s bei modernen Einrichtungsgegenständen zu einem schnelleren Absinken der raucharmen Schicht kam als bei älteren Möbeln. Gleichzeitig kam es bei modernen Einrichtungsgegenständen im Vergleich zu klassischen Möbeln sowohl zu einer höheren maximalen Rauchgaskonzentration (CO₂ = +154 %; CO: +194 %; HCN: +107 %) als auch zu höheren maximalen Rauchgastemperaturen.

Bei der Untersuchung der Ventilationsbedingungen zeigte sich, dass es bei geöffneten Fenstern gegenüber geschlossenen Fenstern 300 s nach Zündbeginn zu einem langsameren Absinken der raucharmen Schicht im Brandraum kam. Des Weiteren konnte ermittelt werden, dass die maximalen Rauchgastemperaturen und -konzentrationen bei geöffneten Fenstern im Vergleich zum Versuch mit geschlossenen Fenstern deutlich höher waren (CO₂: +185 %; CO: +1254 %; HCN: +4161 %) [2].

2.5 Untersuchung von Coppalle, Garo et al.

Coppalle, Garo et al. [3] führten Brandversuche in einem geschlossenen Seecontainer durch. Hierfür wurden 323 kg Holzpaletten in einem Seecontainer gezündet. Dabei wurden neben der Raumtemperatur und dem Abbrandgewicht auch die Sauerstoffkonzentration und die Rauchtemperatur an der Ausgangstüre gemessen. Bis 250 s nach der Zündung nahm die Sauerstoffkonzentration ab und blieb dann konstant auf 4 %. Ein genauer Sauerstoffgrenzwert konnte nicht definiert werden, um das Brandregime (siehe *Kapitel 3.4*) zu bestimmen. Dieser hängt nach Coppalle vom Raumvolumen und der Wärmefreisetzungsrate ab [3].

2.6 Untersuchung von Bellivier, Guillaume et al.

Bellivier, Guillaume et al. [6] führten mehrere Raumbrandversuche mit geöffnetem und geschlossenem Fenster durch. In einem 3 x 3 m großen Raum wurde ein Kinderzimmer mit verschiedenen Möbeln eingerichtet (Abbildung 3). Die erste Testreihe wurde bei geschlossenem Fenster durchgeführt. In den ersten beiden Versuchen wurde mit einer glimmenden Zigarette und einer kleinen Flamme nach EN597-2 versucht, die Matratze zu entzünden. Bei beiden Methoden fing die Matratze nicht an zu brennen. Beim dritten Versuch wurde eine Holzkrippe (luftiger Stapel aus

kleinen Holzscheiten) auf der Matratze angezündet. Hierbei entzündete sich die Matratze, das Feuer erlosch jedoch nach ca. 18 Minuten von selbst.

Nach zwei Minuten konnte im dritten Versuch in einer Höhe von zwei Metern ein CO-Anstieg gemessen werden. Bis zum Versuchsende nach 28 Minuten stieg die CO-Konzentration bis 2.300 ppm an. Die CO₂-Konzentration stieg schneller an als die CO-Konzentration und erreichte nach sieben Minuten einen Peak von rund 42.000 ppm. Die Konzentration blieb bis zum Ende des Versuchs weitestgehend stabil. Etwa 3:30 min nach dem Initialbrand erhöhte sich das CO / CO₂-Verhältnis (zu diesem Zeitpunkt 1/130), was auf einen Übergang zum unterventilierten Brandregime schließen lässt. Drei Minuten nach Beginn des Versuchs stieg die Konzentration von Cyanwasserstoff (HCN) an. Laut Bellivier ist der Anstieg der HCN-Konzentration auf den Abbau des Polyurethanschaums (PU) der Matratze zurückzuführen (siehe *Kapitel 3.5*). Die maximal gemessene Temperatur betrug vier Minuten nach Versuchsbeginn auf 2,40 m Höhe ca. 180 °C. Nach dem Peak fiel die Temperatur wieder und stabilisierte sich bei rund 50 °C. Der Brand verursachte ein Loch in der Matratze mit einem Durchmesser von rund 80 cm. Auch der Lattenrost war an einigen Stellen verbrannt. Die Abbrandmasse betrug rund 1 kg [6].



Abbildung 3: Zimmer vor dem Brandversuch [6]

2.7 Untersuchung von Gojkovic

Nach Gojkovic [7] wird der unterventilierte Brand in der Praxis sehr oft von Feuerwehreinsatzkräften angetroffen. Er nennt vier mögliche Varianten der Brandausbreitung bei Sauerstoffmangel:

1. Entweder geht der Brand aus,
2. es kommt zu einer Rückzündung bei Kontakt mit Sauerstoff,
3. es kommt zu einem Backdraft

4. oder es entsteht eine Brandgasexplosion.

Er führte Backdraft-Versuche durch mit dem Zweck, ein reproduzierbares Szenario zu schaffen, das geeignet ist, wenn ein Backdraft-Container zur praxisnahen Ausbildung von Feuerwehrleuten genutzt werden soll.

Insgesamt wurden 13 Versuche in einem modifizierten Schiffscontainer (5,5 m x 2,2 m x 2,2 m) durchgeführt. Um einen unerwünschten Druckaufbau während des Versuchs zu vermeiden, wurde eine Druckentlastungsklappe eingebaut. Zur Containeröffnung mittels Zugdraht aus sicherer Entfernung wurde eine Belüftungsklappe verbaut und für die Zündung des Luft-/Gas-Gemischs ein ca. 1 m langer, beheizbarer Metalldraht verwendet. Als Brandquelle wurde ein Erdgasbrenner in der Containermitte platziert. Erdgas weist vergleichbare Eigenschaften zu den Brandpyrolyseprodukten (siehe *Kapitel 3.5*) auf (z. B. Zündfähigkeit innerhalb bestimmter Grenzen, Dichte kleiner als Luft) und die Konzentrationsverteilung im Raum lässt sich besser steuern als mit Zersetzungsprodukten eines festen Brennstoffs.

Nach der Zündung des Brenners (600 kW) erlosch die Flamme nach etwa 1 min bei einer Sauerstoffkonzentration von ca. 3 %. Der Pyrolyseprozess wurde simuliert, indem das Erdgas weiter ausströmte. Nachdem die gewünschte Gaskonzentration erreicht war, wurde der Brenner ausgeschaltet, der Heizdraht aktiviert und die Belüftungsklappe geöffnet. Bei 8 von 13 Versuchen kam es zu einem Backdraft. Dabei stieg die Temperatur im Container im Bereich der Decke auf über 1.000 °C an. Die Sauerstoffkonzentration stieg nach Öffnen der Belüftungsklappe sofort auf ca. 10 Vol.-% an und fiel während der Durchzündung auf unter 1 Vol.-%. Die unverbrannten Gase entzündeten sich auch außerhalb des Containers unter Bildung eines Feuerballs. Der maximal gemessene Überdruck im Raum betrug ca. 225 Pa. Die Forschenden konnten allerdings keine Erdgaskonzentration ermitteln, bei der mit absoluter Sicherheit ein Backdraft stattfindet [7].

2.8 Untersuchung von Basmer und Zwick

Basmer und Zwick [8] führten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Versuche im Labor- und Realmaßstab zur Untersuchung von Rauchgaskonzentrationen verschiedener Materialien durch. Mittels eines FT-IR-Messsystems wurde eine Vielzahl an Gasen, die bei der Verschmelzung oder Verbrennung entstehen, analysiert. Im Labormaßstab wurden in einer Brandkammer (siehe Abbildung 4) Pyrolyseuntersuchungen mit Einzelproben (PVC, Wolle,

Elektronikplatine) vorgenommen. Im nächsten Schritt wurde ein Modellbrand mit Holz, PVC und Kabelstücken durchgeführt, bevor als letzte Untersuchung der Versuchsreihe ein Zimmerbrand mit Ventilationsöffnung und Inventar mit einem Gesamtgewicht von 730 kg im Realmaßstab durchgeführt wurde (siehe Abbildung 5). Die maximalen Konzentrationswerte der FT-IR-Messungen werden in Tabelle 1 dargestellt.



Abbildung 4: Brandkammer für Pyrolyseuntersuchungen [8]



Abbildung 5: Möbliertes Zimmer vor dem Versuch [8]

Tabelle 1: Maximale Konzentrationswerte der Pyrolyse- und Brandversuche von Basmer und Zwick [8].

Brandgase		Modellpyrolysen/Brand				Zimmerbrand	
		Hart-PVC	Wolle	PC-Platine	Holz/PVC	Messstelle Innen	Messstelle außen
Kohlenmonoxid	CO	270	75	70	2700	1600	5100
Chlorwasserstoff	HCl	10000	0	0	11	1	4
Blausäure	HCN	5	63	5	3	49	55
Ammoniak	NH ₃	3	250	1	8	0	1
Schwefeldioxid	SO ₂	7	3	1	3	96	10
Nitrose Gase	Nox	10	16	7	11	110	44
Kohlenoxidsulfid	COS	0	42	1	3	4	1
Formaldehyd	CH ₂ O	17	2	1	8	1	5
Acrolein	C ₃ H ₄ O	0	1	0	0	3	2
Phosgen	COCl ₂	4	0	2	4	0	0
Benzol	C ₆ H ₆	200	4	16	19	15	43
Phenol	C ₆ H ₆ O	7	1	63	5	14	1
Aromaten		350	21	90	33	45	80
Organik		180	53	48	750	20	28
C1 - C2		400	90	50	1350	180	800

2.9 Fazit der Literaturrecherche

Abschließend lassen sich mehrere Erkenntnisse zusammenfassen:

- Moderne Möbel weisen eine kürzere Brandentstehungsphase und höhere Wärmefreisetzungsraten auf.
- Bei modernen Einrichtungsgegenständen werden im Vergleich zu älteren Möbeln höhere Schadstoffkonzentrationen erreicht.
- Bei Zimmerbränden mit Ventilationsöffnung werden höhere Rauchgastemperaturen erreicht.
- Es kann kein Sauerstoffgrenzwert definiert werden, um das Brandregime bestimmen zu können.
- Durch erhöhte Luftdichtheit in modernen Gebäuden tritt das unterventilierte Brandregime früher ein und die Möglichkeit der Entstehung eines Backdraft bei plötzlicher Sauerstoffzufuhr steigt.

Die Literaturrecherche ergab, dass in der Vergangenheit bereits einzelne Versuche zu unterventilierten Bränden und Bränden von modernen Möbeln durchgeführt worden sind. Dennoch besteht für diese Thematik weiterhin Forschungsbedarf, da der Einfluss der Ventilationsbedingungen auf den Brandverlauf und die entstehenden Abgase noch nicht vollumfänglich untersucht sind.

Als weiteres Ergebnis der Recherche wurde festgestellt, dass Sicherheitsvorkehrungen im Brandraum getroffen werden müssen, um das explosionsfähige Gemisch bei Bedarf abkühlen zu können. Damit soll bei Durchführung der Versuche die Entstehung eines Backdraft verhindert werden.

unter Abgabe von Wärme und Licht“ [11]. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, wird die erzeugte Wärme in Form von Wärmestrahlung und Konvektion übertragen bzw. an die Umgebung abgegeben [10].

Bei der Wärmestrahlung werden elektromagnetische Wellen hauptsächlich im Infrarot-Bereich emittiert, was im Brandfall vor allem durch den heißen Ruß in der leuchtenden Flamme geschieht. [10].

Die konvektive Wärmeübertragung stellt die Aufnahme und Abgabe von Wärme durch Fluide dar. Diese Fluide können sowohl flüssig als auch gasförmig sein [12] [10]. Für die Übertragung wird die Wärme an Materie gebunden, transportiert und wieder abgegeben [10].

Neben der Ventilation sind die brennenden Stoffe bzw. deren Gemische eine wesentliche Einflussgröße für den Brand. Sie lassen sich unter anderem nach deren Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) einteilen. Abbildung 6 zeigt, wie die Verbrennung von Gasen und Dämpfen aussieht, welche mit einer Flamme verbrennen, in der Sauerstoff mit Brennstoff reagiert.

Bei einem Feststoffbrand läuft unter Flammen und/oder Glutbildung die Verbrennung ab. Durch Pyrolyse wird der Feststoff zersetzt oder durch Schmelzen in den Aggregatzustand "Flüssigkeit" überführt, die wiederum verdampft. Die daraus entstehenden brennbaren Dämpfe können bei ausreichender Brandenergie unter Flammenbildung abbrennen. Anders verhält es sich bei einem Glutbrand, welcher ohne Flammenbildung abläuft. Die dabei entstehenden Pyrolysegase kondensieren hauptsächlich mit der kalten Luft mit einhergehender Aerosolbildung [13] zitiert nach [10].

3.2 Einflussgrößen

Abbildung 7 zeigt die wesentlichen Einflussgrößen auf einen Brand und dessen daraus hervorgehende Ausprägungen. Die Einflüsse von Ventilation und Umgebung auf einen Brand werden im Abschnitt 3.4 dargestellt. Ausgewählte Ausprägungen wie Abbrandrate oder Energiefreisetzung werden im folgenden *Abschnitt Brandkenngrößen* dargestellt.

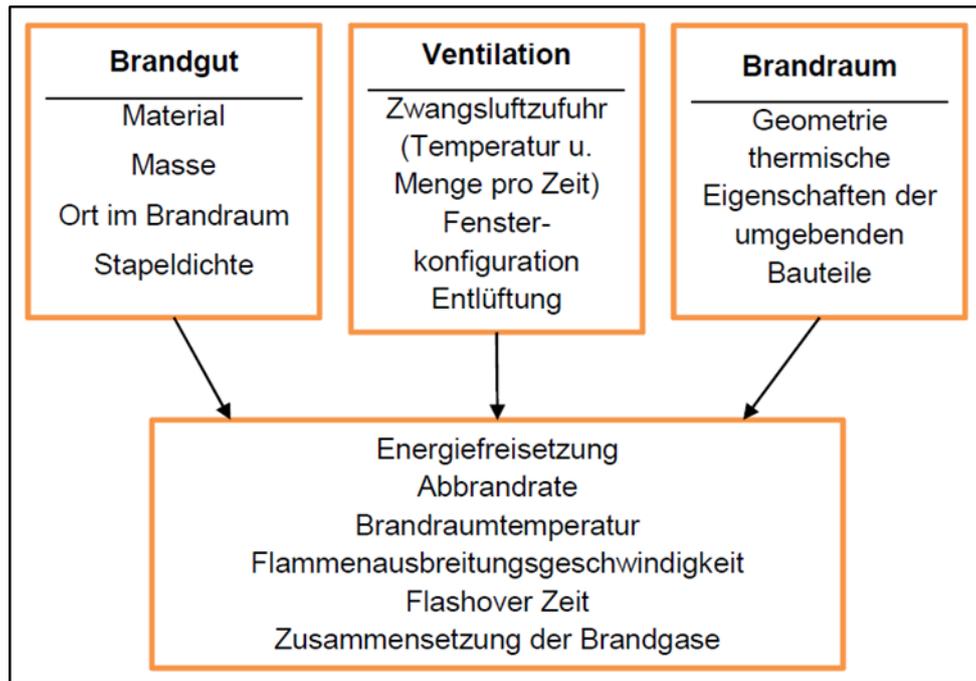


Abbildung 7: Einflussgrößen auf einen Brand [14] zitiert nach [10]

3.3 Brandkenngrößen

Um einen Brand zu beschreiben, gibt es Kenngrößen, welche im Folgenden dargestellt werden.

Messbar ist die umgesetzte Brandlast über die Abbrandrate. Diese beschreibt die umgesetzte Brandlast pro Zeit. Die Abbrandrate ist für jeden Stoff unterschiedlich und hat neben der stofflichen Zusammensetzung auch mit der Anordnung zu tun [10].

Die Energiefreisetzung oder Brandleistung beschreibt die freiwerdende Energie pro Zeit. Sie wird in Watt angegeben und ist eine wichtige Größe zur Beschreibung eines Brandes [10].

Der untere Heizwert H_U beschreibt die bei einem Brand entstehende Wärmemenge bezogen auf die Masse des Brennstoffs. Das entstehende Wasser im Abgas ist gasförmig.

Der obere Heizwert H_0 setzt sich aus dem unteren Heizwert und der Kondensationswärme des Wasserdampfes zusammen. Er ist daher etwas höher als der untere Heizwert [12].

Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur einer brennbaren Flüssigkeit, bei der sich ausreichend brennbare Gase über dem Stoff bilden, damit eine Verbrennung stattfinden kann. Die Flamme erlischt nach dem Entfernen der Zündquelle wieder, da

nicht ausreichend Dämpfe zum selbstständigen Verbrennen gebildet werden. Der Brennpunkt liegt grundsätzlich über dem Flammpunkt und ist die niedrigste Flüssigkeitstemperatur, bei der sich eine ausreichende Menge an Dämpfen bildet, sodass nach einer Entzündung ein eigenständiges Weiterbrennen erfolgt.

Das Dichteverhältnis ist für die Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens von Gasen und Dämpfen relevant. Um ein Verhältnis anzugeben, wird Luft als Referenzfaktor angenommen. Hat der Stoff ein Dichteverhältnis von < 1 , ist er leichter als Luft, bei einem Verhältnis von > 1 ist er schwerer als Luft [15].

Der Zündbereich beschreibt den Bereich zwischen der unteren (UEG) und der oberen Explosionsgrenze (OEG), in dem Luftgemische von Gasen, Dämpfen oder Stäuben nach dem Zünden selbstständig brennen können. Liegt die Konzentration eines brennbaren Stoffes unterhalb der UEG, ist das Gemisch zu mager. Liegt die Konzentration oberhalb der OEG, ist das Gemisch zu fett. Nur im Explosionsbereich liegt ein entsprechendes Mischungsverhältnis für eine Verbrennung vor [15].

Tabelle 2 zeigt die beiden Grenzen und die Zündtemperatur für ausgewählter Stoffen.

Tabelle 2: Auswahl brennbarer Brandgase [16]; [17] zitiert nach [18], [19], [20]

Pyrolysegas	UEG in Vol.- %	OEG in Vol.- %	Zündtemperatur in °C
Kohlenstoffmonoxid (CO)	10,9	76,0	605
Methan (CH ₄)	4,4	17,0	595
Acetylen (C ₂ H ₂)	2,3	100,0	305
Ethen (C ₂ H ₄)	2,4	32,6	440
Ethan (C ₂ H ₆)	2,4	14,8	515
Wasserstoff (H ₂)	4,0	77,0	560
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	3,9	45,5	220
Cyanwasserstoff (HCN)	5,5	46,6	535

3.4 Brandverlauf bei Raumbränden

Ein Brandverlauf wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, dem vorhandenen Raumvolumen, der Brandlast, der Brandentwicklung, der Temperatur sowie der Sauerstoffkonzentration im Raum. Klassifiziert wird ein Brandverlauf nach seinen Grenzbedingungen, von der nötigen Verbrennungsluft oder der Brandlast. Dieser

Abschnitt stellt beide Brandverläufe einschließlich der sich daraus ergebenden Phänomene dar.

Brandverlauf mit Ventilationsöffnung

Wenn genug Sauerstoff für eine Verbrennung zur Verfügung steht und die Brandintensität von der Brandlast abhängig ist, spricht man von einem brandlastgesteuerten Brand [18]. Abbildung 8 zeigt den Verlauf eines Brandes mit Ventilationsöffnung.

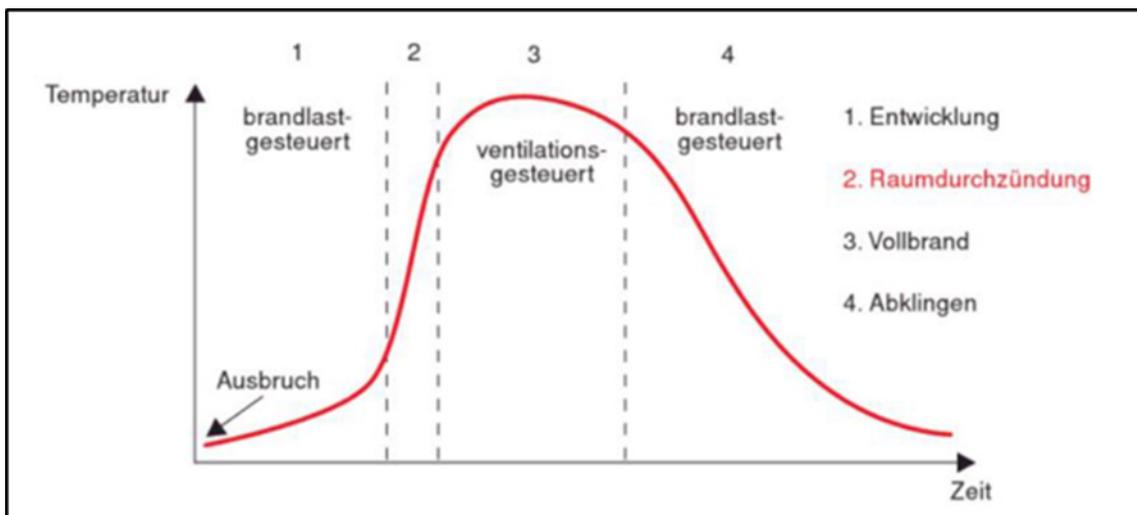


Abbildung 8: Charakteristischer Verlauf eines Zimmerbrandes bei vorhandener Zuluftöffnung [21] zitiert nach [18]

Der dargestellte Brandverlauf ist in vier Abschnitte unterteilt. Der Zeitpunkt der Entzündung markiert den Beginn der Brandentstehungsphase mit einhergehendem Anstieg der Wärmefreisetzungsrate. Es handelt sich in dieser Phase um einen brandlastgesteuerten Brand, da ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht und die Verbrennung von den Eigenschaften des brennenden Stoffes abhängt. In der zweiten Brandphase kommt es zur Raumdurchzündung. Die Voraussetzung dafür ist, dass genügend Sauerstoff zur Verfügung steht und die Gegenstände durch die hohen Temperaturen ausreichend thermisch aufbereitet sind. Der Feuerübersprung auf andere Gegenstände im Raum findet ab einer Rauchtemperatur von ca. 600 °C statt. Diese Durchzündung ist auch unter dem Namen „Flashover“ bekannt. Große Mengen an Brandrauch, der unter Druck aus dem Brandraum strömt, oder Flammzungen, die an der Grenzschicht zu sauerstoffreicher Luft entstehen, sind Anzeichen für einen bevorstehenden Flashover [22]; [23] zitiert nach [18].

Die dritte Phase wird als Vollbrand bezeichnet. Nach dem Flashover stehen alle Einrichtungsgegenstände in Flammen. Da in dieser Phase der Brand einen hohen Sauerstoffbedarf hat, jedoch nicht ausreichend Sauerstoff für eine stöchiometrische Verbrennung durch das Fenster oder die Tür nachströmen kann, handelt es sich in dieser Zeitspanne um einen ventilationsgesteuerten Brand. Der Übergang vom brandlast- zum ventilationsgesteuerten Brand ist fließend und lässt sich nicht festlegen. Bei entsprechenden Mengen an Brandlast wird ein Raumbrand im Normalfall immer in einen unterventilierten Zustand übergehen, es sei denn, die Ventilationsöffnungen sind ausreichend groß oder das Raumvolumen selbst sorgt für eine ausreichende Bereitstellung an Verbrennungsluft.

In der vierten Phase kommt es zum Abklingen des nun erneut brandlastgesteuerten Brandes, da nicht mehr ausreichend Brandlast zur Verfügung steht [18].

Brandverlauf ohne Ventilationsöffnung

Im Vergleich zu Bränden mit Ventilationsöffnung verhält sich der Verlauf bei Bränden ohne Ventilationsöffnung (Abbildung 9) anders, da hier die Verbrennung durch das zur Verfügung stehende Luftvolumen limitiert und eingeschränkt ist.

Bei einem geschlossenen Raum mit keinen oder zu geringen Zu- und Abluftströmen steht nicht ausreichend Sauerstoff für eine dauerhafte (stöchiometrische) Verbrennung zur Verfügung. Dieser Sauerstoffmangel führt zu einem Anstieg der Anteile an Kohlenstoffmonoxid, Ruß und Pyrolysegasen. Außerdem wird die thermische Leistung verringert und damit verlangsamt sich auch die Verbrennungsgeschwindigkeit. Dieser Brandverlauf wird als ventilationsgesteuert bezeichnet.

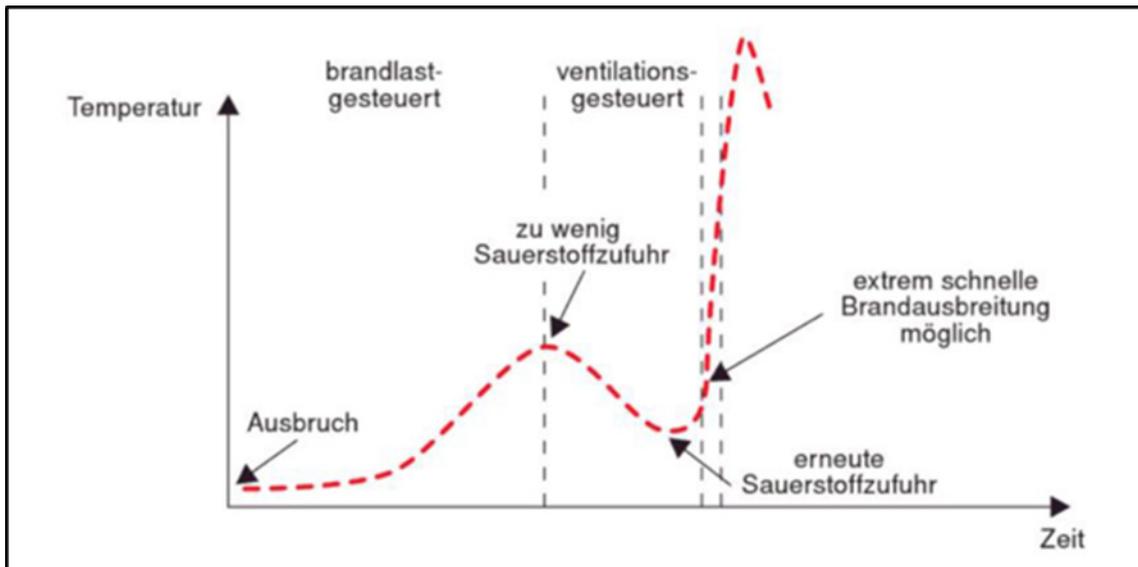


Abbildung 9: Brandverlauf eines Zimmerbrandes ohne Zuluftöffnung und Entstehung eines Backdrafts [21]; zitiert nach [18]

Die erste Phase des Brandausbruchs in Abbildung 9 ist in beiden Fällen identisch. Zu diesem Zeitpunkt reicht die im Raum vorhandene Luftmenge aus, dass eine Brandentstehung möglich ist. Es kommt zu einem Anstieg von Brandintensität und Temperatur. Da jedoch in der zweiten Phase nicht ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht, kommt es nicht zum Flashover. Der Pyrolyseprozess kann durch die erhöhten Temperaturen jedoch ablaufen und es kommt zur Ansammlung unverbrannter Pyrolysegase im Falle eines Schwelbrandes.

Wenn ab diesem Zeitpunkt beispielsweise ein Fenster oder die Tür zum Brandraum geöffnet wird, kann es in dieser dritten Phase zu einer schlagartigen Entzündung in Verbindung mit einem steilen Temperaturanstieg kommen [18]. Wird jedoch keine Zuluftöffnung geschaffen geht der Brand aus.

Diese schlagartige Entzündung kann zu zwei Brandphänomenen führen, dem „Rollover“ oder dem „Backdraft“.

Ein „Rollover“ entsteht, wenn überhitzte zündfähige Pyrolysegase aus dem unterventilierten Brandraum in einen sauerstoffreichen Bereich eindringen und sich dann entzünden. Dabei kommt es zu einer Stichflamme ohne einen signifikanten Druckanstieg. Man spricht von einem „Rollover“, weil die Feuerwehrleute beim Innenangriff vom Feuer überrollt werden [22]; [23] zitiert nach [18].

Die schlagartige Durchzündung von großen Rauchgasmengen wird als „Backdraft“ bezeichnet.

Wenn nicht ausreichend Sauerstoff in den Brandraum strömt, entwickelt sich ein Schmelbrand. Das führt zur Bildung großer Mengen unverbrannter Pyrolysegase. Es entsteht ein Unterdruck, weil das heiße Gas mehr Wärme an die Wände abgibt als es aus dem Brand zugeführt bekommt.

Wenn eine Tür oder ein Fenster plötzlich geöffnet wird, strömt durch den Unterdruck sauerstoffreiche Luft in den Raum. Wenn noch Glutnester vorhanden sind oder die Temperatur des Gases oberhalb der Zündgrenze liegt, verbrennt das zündfähige Gemisch schlagartig. Da der Druckanstieg unter 100 mbar liegt, handelt es sich nicht um eine Explosion, sondern um eine Verpuffung [24]; [25], [26]; zitiert nach [18].

3.5 Brandstoffe

Der Brand in seiner Entwicklung hängt, wie bereits dargestellt, wesentlich von seinen Ventilationsbedingungen und der Brandlast ab. Im Grundlagenabschnitt „*Der Brand*“ wurden die Unterschiede von Brandlasten anhand der Aggregatzustände und deren Verbrennung dargestellt. In diesem Abschnitt werden die an einem Zimmerbrand beteiligten Feststoffe detaillierter betrachtet und für die Arbeit relevante Unterschiede zwischen Möbeln alter und neuer Bauart, in der Arbeit als moderne Möbel bezeichnet, aufgezeigt.

Der Ausdruck "moderne Möbel" stellt einen Überbegriff für Möbel dar, die vom späten 19. Jahrhundert an produziert wurden. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff auf industriell massengefertigte Möbel, die nicht aus Massivholz bestehen sondern hohen Kunststoffanteil haben oder einen Aufbau aus Pressspanholz und/oder Pappe haben [1].

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen den strukturellen Aufbau moderner Möbel.



Abbildung 10: Schnitt durch zwei verschiedene Arten moderner Möbelstrukturen [1]



Abbildung 11: Schnitt im Detail eines modernen Möbelstücks mit Wabenstruktur [1]

In Abbildung 10 wird ersichtlich, dass ein Großteil des Volumens innerhalb der beiden außenliegenden lackierten Holzfaserplatten keinen Materialanteil hat. Die Stabilität sowie die Material- und Gewichtseinsparung wird durch die Wabenstruktur aus Pappe möglich. Kantenumleimer an den Kanten bilden die äußerste Schicht. Abbildung 11 zeigt mittig neben der schon dargestellten Wabenstruktur die unter dem Kantenumleimer liegende Spanplatte, was im Schnitt auf der linken Seite dargestellt ist.

Da ein Brandverlauf wesentlich von seiner zur Verfügung stehenden Brandlast abhängt, wurden an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik aus diesem Grund 2019 mehrere Versuche zu genannter Thematik durchgeführt. Dabei wurden die Brandeigenschaften und Rauchgasemissionen von Massivholz- und spanplattenbasierten Werkstoffen bei Versuchen im Labormaßstab betrachtet.

Abbildung 12 zeigt den Verlauf von Wärmefreisetzungsrate und Temperatur über eine Messzeit von etwa 30 min beim Vergleich von Massivholz und modernen spanplattenbasierten Möbeln. Die integrale Wärmefreisetzung von spanplattenbasierten Möbeln ist etwa 20 % höher. Begründet wird die Intensität und der schnellere und heftigere Brandverlauf mit der geringeren Masse und dem strukturellen Aufbau, der durch die vielen Luft beinhaltenden Hohlräume eine größere Oberfläche aufweist und so die Verbrennung beschleunigt [1].

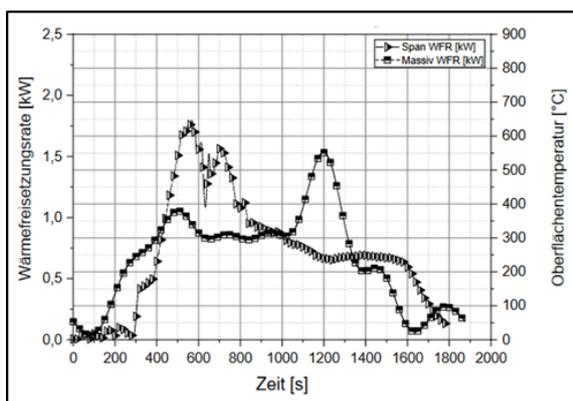


Abbildung 12: Vergleich von spanplatten- und massivholz-basierten Möbeln in Bezug auf die Wärmefreisetzungsrate [1]

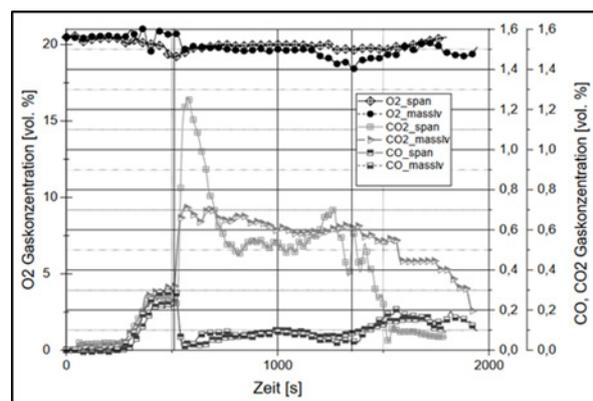


Abbildung 13: Abgasemissionen [1]

Ebenso wurden in diesen Brandversuchen die genannten Stoffe nach ihren Abgasemissionen CO, CO₂ und O₂ untersucht. Abbildung 13 zeigt deutlich sichtbare

Unterschiede, besonders in Bezug auf das Produkt einer vollständigen Verbrennung, CO_2 [1].

In zwei weiteren Versuchen wurde mittels Wärmeeintrag durch einen Wärmestrahler untersucht, welche Blausäurekonzentrationen im Schwelbereich verschiedener Möbelstücke auftreten. Abbildung 14 zeigt die im Abgas gemessenen HCN-Konzentrationen. Die beiden Versuche weisen nur eine geringe Abweichung untereinander auf, die Versuchsdurchführung ist also gut reproduzierbar. Auffällig ist die hohe Abweichung der HCN-Konzentrationen zwischen Massivholz und Spanplatten mit Werten von über 60 Vol.-ppm im Vergleich zu 0,5 Vol.-ppm. [1].

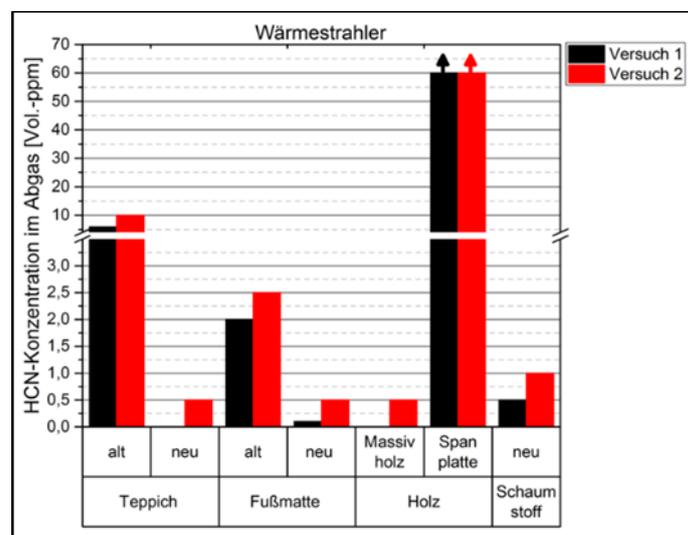


Abbildung 14: HCN-Konzentrationen im Schwelbrandbereich von ausgesuchten Möbelstücken [1]

Die dargestellten Versuche verdeutlichen, dass die in Bezug auf den Brandverlauf und bei den aus der Verbrennung entstehenden Produkten eine Intensitätszunahme messbar ist. Der folgende Abschnitt *Rauchgase* behandelt die Entstehung sowie die Gefährdung von ausgewählten, bei Zimmerbränden, entstehenden Rauchgasen.

Rauchgase

Der oftmals sichtbare Rauch kann definiert werden als die „Summe gasförmiger Produkte, die beim Verbrennen oder Pyrolysieren organischen Materials entstehen und sowohl flüssige als auch feste Partikel sowie nicht abreagierte Reaktionsgase enthalten“ [27].

Zur Entstehung von Rauch als Verbrennungsprodukt kommt es, wenn die Verbrennung nicht vollständig abläuft [1]. Die Farbe des Rauchs hängt von den Reaktionsprodukten ab. Nicht nur durch die Verbrennung bilden sich Rauchgase,

sondern auch durch die Zersetzung von Materialien, der sogenannten Pyrolyse. Noch nicht in Brand stehende Gegenstände werden durch Wärmestrahlung, welche durch die Rauchgase abgegeben wird, thermisch beaufschlagt und beginnen „auszugasen“. Dabei kann Rauch sowohl bei Schwelbränden als auch bei Vollbränden entstehen, unterscheidet sich aber dann hinsichtlich seiner Reaktionsprodukte und Toxizität. Der freigesetzte Rauch wird nach seiner Entstehung bei Schwel- und Vollbränden unterteilt. Der bei Schwelbränden entstehende Rauch ähnelt dem aus chemischer Degradation organischer Materialien durch Erwärmung entstehenden Rauch. Dieser zeichnet sich durch oftmals strengen Geruch und leichte Rauchspuren aus. Durch die Verschwelung kommt es zur Aerosolbildung aus der Kondensation flüchtiger Stoffe mit kalter Luft. Die Aerosole bestehen aus kleinen Tropfen und Partikeln. Durch den Rauch beaufschlagte und verrußte Oberflächen weisen einen öligen Charakter auf. Neben der genannten Aerosolbildung kommt es durch die unvollständige Verbrennung zur Bildung von Zwischenprodukten wie Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Weiterem [28], zitiert nach [1].

Der aus Vollbränden entstandene Rauch unterscheidet sich dahingehend, dass er hauptsächlich aus durch unvollständige Verbrennung und Pyrolyse unter geringer Sauerstoffzufuhr entstandenen Feststoffpartikeln besteht [28], zitiert nach [1].

Rauchgase, also die Verbrennungsprodukte, können brennbar, explosiv und/oder toxisch sein. Die Mehrheit der allgemein als „Brandopfer“ bezeichneten verstorbenen Personen ist nicht direkt durch die Brandeinwirkung, sondern durch die Inhalation von toxischem Brandrauch verstorben. [29]; [16]; zitiert nach [18].

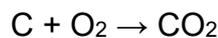
Die Stoffzusammensetzung der flüchtigen Stoffe, die durch Pyrolyse und Verbrennung entstehen, ist komplex. Der Grund für die Komplexität ist, dass die Moleküle durch die Spaltung von langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen, sogenannten Polymeren, entstehen. Bestandteil der bei einem Brand entstehenden Rauchgase ist zum großen Teil Kohlenmonoxid (CO). Wenn in die Verbrennung Kunststoff involviert ist, entstehen weitere toxische Gase wie Blausäure (HCN), Salzsäure (HCl), Ammoniak (NH₃), Stickoxide, Benzol, Salzsäure, Formaldehyd, organische und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie weitere Gase [8]. In welcher Menge Schadstoffe entstehen, ist dabei von Brennstoff, Temperatur und Ventilationsbedingungen abhängig [1]. Im Folgenden werden ausgewählte Gase hinsichtlich ihrer Entstehung und Toxizität dargestellt.

Kohlenmonoxid, mit einer Zündtemperatur von 605 °C, gilt als häufigste Todesursache bei Rauchgasvergiftungen, da es sich anstelle von Sauerstoff in Form von Carboxyhämoglobin an Hämoglobin (roter Blutfarbstoff) bindet. Die Bindungskraft der Carboxylgruppe ist ca. 200- – 300-mal stärker als die Bindungskraft des Sauerstoffkomplexes. Das hat zur Folge, dass CO den Sauerstofftransport im Blut einschränkt und direkt zum Tod führen kann. Tabelle 3 stellt den Zusammenhang zwischen letaler Dosis und Expositionsdauer dar [1].

Tabelle 3: Letale CO-Dosis nach verschiedenen Expositionsdauern [16]; zitiert nach [18])

Dauer	min	2	5	10	30	60
Anteil	ppm	40.000	16.000	8.000	3.000	1.500
	%	4,0	1,6	0,8	0,3	0,15

Bei vollständiger Verbrennung von organischen Stoffen wird im Idealfall das als Zwischenprodukt (siehe Abbildung 15) entstandene Kohlenstoffmonoxid vollständig zu Kohlenstoffdioxid oxidiert.



Gl. 3.1

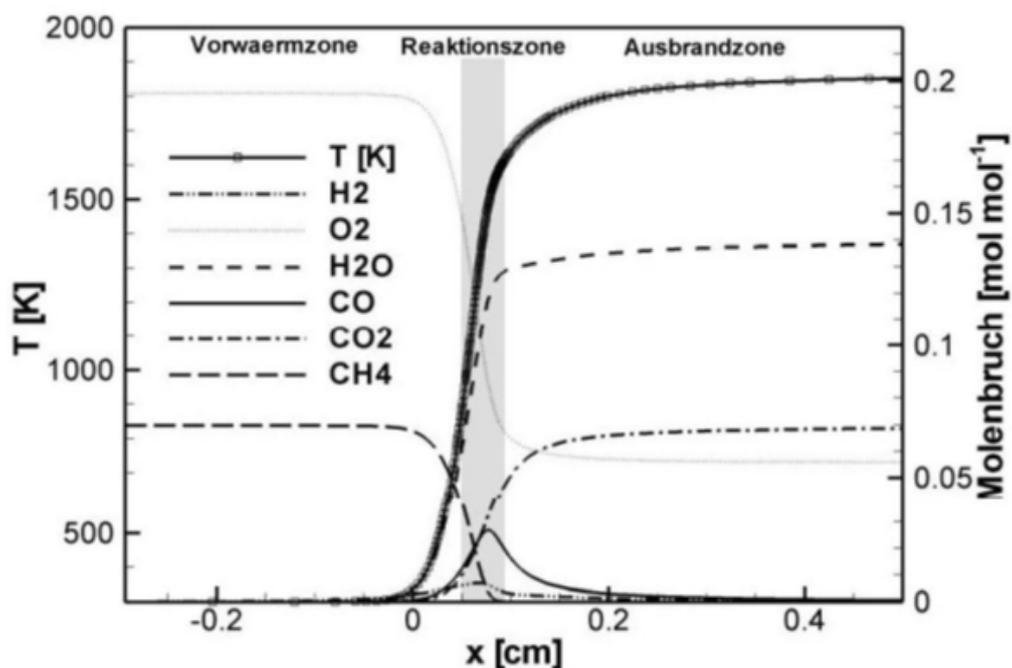


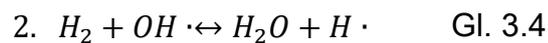
Abbildung 15: Temperatur- und Konzentrationsverläufe für eine Methan-Luft-Vormischflamme [30]

Bei unvollständiger Verbrennung hingegen bleibt immer ein Rest an CO im Abgas vorhanden. Gründe hierfür können eine zu fette oder zu magere Verbrennung sein [1].

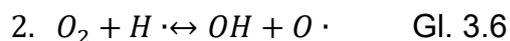
Bei sinkender Sauerstoffkonzentration verstärkt sich die Bildung von CO gemäß der Formel:



Durch den Sauerstoffmangel steht die CO-Oxidation nach Gleichung 3.3 (für den fetten Bereich) in Konkurrenz zur Wasserstoff-Oxidation. [11].



Für den mageren Bereich verhält sich die CO-Oxidation anders, da diese nicht mehr in Konkurrenz zur H₂-Produktion steht:

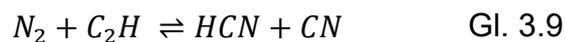
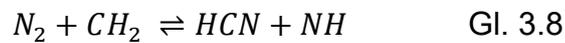
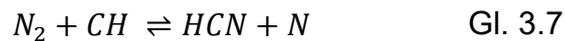


[31] zitiert nach [1]

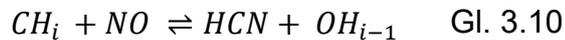
Stickoxide, auch NO_x genannt, entstehen auf verschiedene Arten. Neben der Bildung aus molekularem Luftstickstoff durch zwei unterschiedliche Mechanismen ist auch eine Bildung aus brennstoffgebundenem Stickstoff möglich. Für die NO-Bildungsmechanismen durch molekularen Luftstickstoff ist die Verbrennungstemperatur entscheidend. So kann es bei niedrigen Temperaturen zur Prompt-NO-Bildung kommen und bei hohen Temperaturen zu thermischer NO-Bildung. Damit es zur thermischen NO-Bildung kommt, ist eine ausreichend hohe Mindesttemperatur zum ausreichend schnellen Reaktionsablauf nötig. Zusätzlich ist

eine ausreichende Verweilzeit und ein Sauerstoffangebot nötig [30]. Durch die Luftfeuchtigkeit können Stickoxide zu Salpetersäure (HNO_3) weiterreagieren [11] zitiert nach [1].

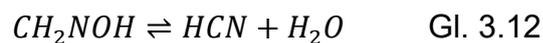
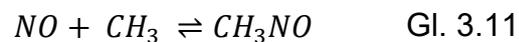
Bei einer Verbrennung oder Verschwelung von stickstoffhaltigen Kunststoffen wie Polyurethan kann **Cyanwasserstoff** entstehen, auch bekannt als Blausäure. Er entsteht beispielsweise durch die Reaktion von Kohlenwasserstoff mit Stickstoff:



oder durch Stickstoffmonoxid mit einem CH_i -Radikal:



Beispielsweise mit einem CH_3 -Radikal in folgenden Schritten:



[32] zitiert nach [33]

Neben den dargestellten Reaktionsmechanismen laufen parallel noch weitere Reaktionen ab. Ein Teil dieser ablaufenden Reaktionen ist das NO-Recycling

(Abbildung 16). Bei diesem Ablauf wird der mit anderen Stickstoffverbindungen im Gleichgewicht stehende Cyanwasserstoff sowohl gebildet als auch abgebaut.

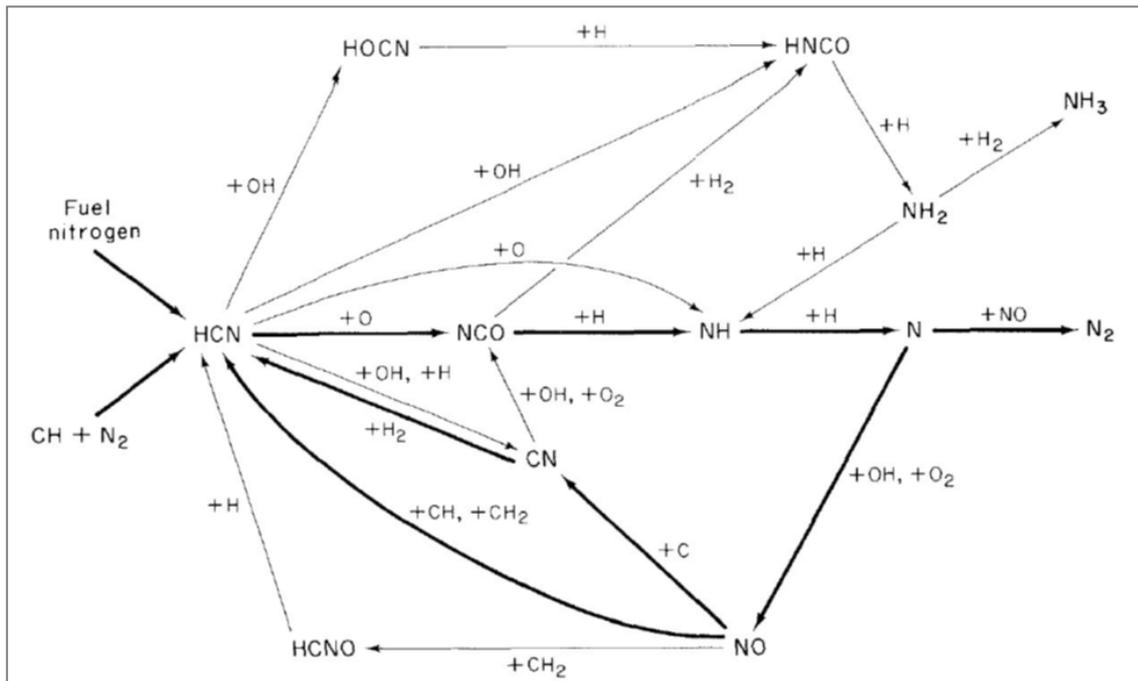


Abbildung 16: NO-Recycling [34]

Bei Raumtemperatur liegt HCN als eine leicht flüchtige Flüssigkeit oder als Gas (Siedepunkt 26 °C) vor. Blausäure riecht nach Bittermandel und ist farblos. Gasförmiger Cyanwasserstoff ist leicht entzündlich, da er sehr reaktionsfähig ist. Die Selbstzündtemperatur liegt bei 535 °C, der Flammpunkt bei > -20 °C. Des Weiteren ist der Stoff in Wasser löslich und kann sich somit auch in der Luftfeuchtigkeit lösen. Wenn die Temperatur über 180 °C steigt, kann eine exotherme Polymerisation stattfinden, die sich bis zu einer Explosion beschleunigen kann. Cyanwasserstoff ist hoch toxisch und kann über die Atemwege und über die Haut aufgenommen werden. Bei Kontakt kann es durch seine inhibierende Wirkung auf die Zellatmung zu Störungen des Stoffwechsels, Herz-Kreislauf- und Nervensystems sowie zu Atemproblemen kommen. Bereits nach wenigen Sekunden kann Cyanwasserstoff zum Tod führen [1]

Bei einer Verbrennung kann **Ruß** entstehen, ein pulverförmiger, schwarzer Feststoff. Die Bildung von Ruß beruht auf polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Sie bilden sich gewöhnlich bei fetten Umgebungsbedingungen. PAKs sind durch ihre kanzerogenen Eigenschaften gesundheitsschädlich [1].

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe spielen neben dem Automobilsektor oder der Industrie auch bei Raumbränden eine Rolle, da sie ein wichtiger Indikator bzw. im Abgas das Ergebnis einer unvollständigen Verbrennung von C_xH_y -Brennstoffen sind. Die Komponenten sind entweder vollständig unverbrannt oder teiloxydiert [35]. Die Entstehung unverbrannter Kohlenwasserstoffe (HC), beispielsweise für Verbrennungsmotoren, ist gut untersucht. Zur Bildung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) kommt es unter anderem bei ausgewählten, von Verbrennungsmotoren auf Raumbrände übertragbaren Phänomenen:

- Flammenverlöschung an der kalten Wand [11]
- Fetter Verbrennung (PAK) [36]

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) stellen eine wichtige Gruppe der unverbrannten Kohlenwasserstoffe dar. Viele PAKs weisen krebserregende und erbgutverändernde Eigenschaften auf [37] nach [38]. Darüber hinaus sind einige PAKs, neben den langfristigen Folgen, toxisch für den Menschen und andere Organismen [37]

4 Versuchsaufbau und Messtechnik

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau, die Messtechnik und das experimentelle Setup der Raumbrandversuche an der FFB beschrieben.

Für die Beantwortung der Fragestellungen dieses Forschungsberichts werden vier Raumbrandversuche an der FFB durchgeführt. Alle Versuche werden im gleichen Brandraum und mit der gleichen modernen Innenausstattung durchgeführt. Als Initialbrand wird eine Wanne gefüllt mit 100 ml Isopropanol unterhalb des Bettes verwendet. Es ist geplant, dass in den ersten beiden Brandversuchen das Fenster zum Brandraum geöffnet bleibt und im dritten Versuch geschlossen ist. Im vierten Versuch sollen die Ventilationsbedingungen mittels des Fensters während des Ablaufs verändert werden. Die Tür bleibt bei allen Versuchen geschlossen.

Unter dem Ansatz der Reproduzierbarkeit ist das Ziel, durch die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen sowohl ventilierte als auch unterventilierte Raumbrände und deren einhergehende Abgaskonzentrationen zu untersuchen. Die bereits in anderen Projekten untersuchten modernen Möbel werden in allen Versuchen eingesetzt und deren Brandverhalten betrachtet.

Brandraum und Brandlast

Der 25 m² große und 2,70 m hohe Brandraum befindet sich in der Brandversuchshalle der FFB in Karlsruhe. Der Versuchsraum dient der realitätsnahen Durchführung von Raumbränden. Als Ventilationsöffnung verfügt der Brandraum über ein 1,0 m x 1,0 m großes Fenster und eine 2,35 m x 0,96 m große Tür. Zur Absaugung der Rauchgase in der Halle steht eine Deckenabsaugung mit einer maximalen Leistung von ca. 60.000 Normkubikmeter pro Stunde zur Verfügung. Für den Versuch wird die Absaugung mit einer Leistung von 30.000-40.000 Nm³/h betrieben. Um das Fenster beim dritten und vierten Versuch verschließen zu können, wird vor die Öffnung eine Metallplatte montiert.

In Abbildung 17 ist der Grundriss des Raumes dargestellt:

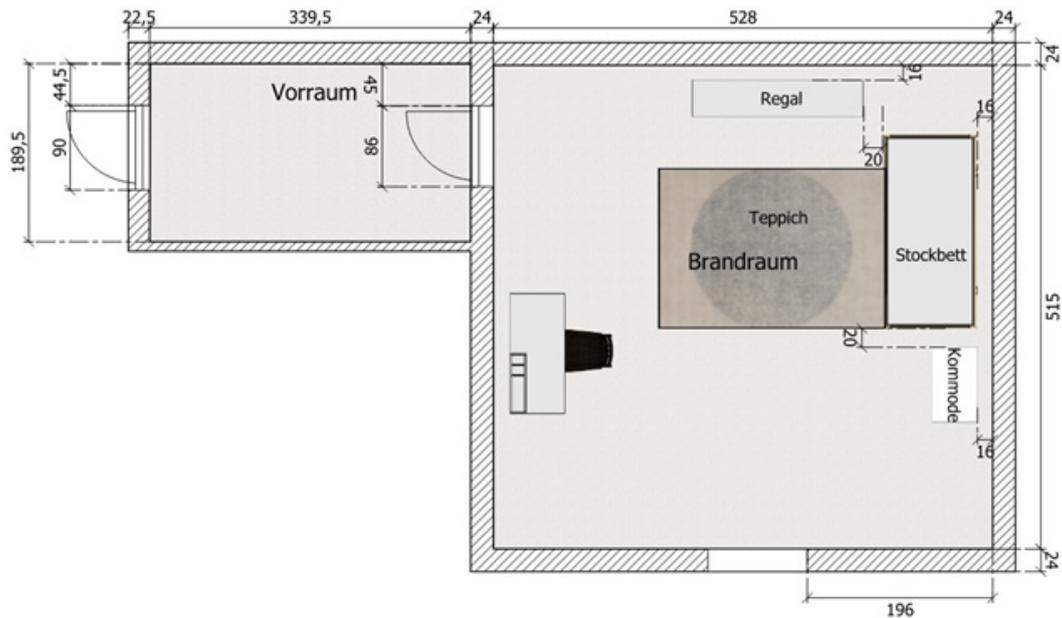


Abbildung 17: Grundriss des Brandraums (Eigene Darstellung, 2021)

Für die Versuche wurde der Raum in Nachbildung eines Kinderzimmers eingerichtet. Aufgrund des Anspruchs an die Nachprüfung der Reproduzierbarkeit wurden preiswerte und weit verbreitete Einrichtungsgegenstände moderner Bauart verwendet. Diese standen in vierfacher, identischer Ausführung zur Verfügung. Wie in *Kapitel 2 Literaturrecherche* beschrieben, zeichnen sich moderne Möbel unter anderem durch einen erhöhten Spanplatten- und Kunststoffanteil aus. Dies kann im Vergleich zu älterem Mobiliar robusterer Bauart zu einer schnelleren Brandentwicklung und zu einer erhöhten CO- und HCN-Entstehung führen. Eine Auflistung ist in Tabelle 4 zu finden:

Tabelle 4: Auflistung der Einrichtungsgegenstände (Eigene Darstellung, 2021)

Gegenstand	Gewicht in kg
Doppelstockbett	51
Beistellkasten	6
Kommode	48
Regal	50
Schreibtisch	13
Stuhl	3
Teppich	2
Matratze (2x)	9
Bettbezug (2x), Kopfkissen (2x), Decke (2x), Kissen (1x)	4
Gesamt	186

In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind ein 3D-Modell und ein Foto des möblierten Brandraumes zu sehen.

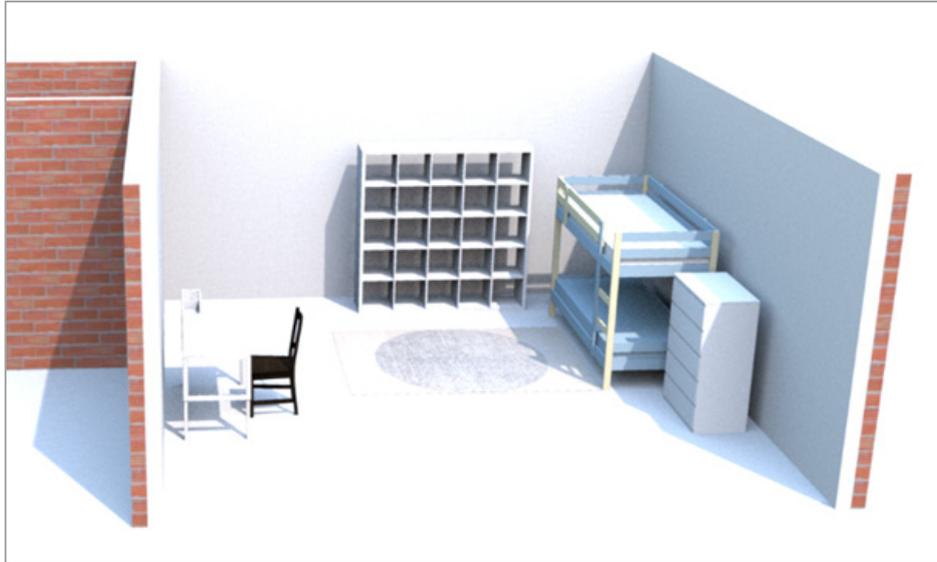


Abbildung 18: 3D-Modell des möblierten Brandraums (Eigene Darstellung, 2021)



Abbildung 19: Foto des möblierten Brandraums (Eigene Darstellung, 2021)

Messtechnik

Zur Messung der Parameter Temperatur, Druck und ausgewählter Gase (O_2 , CO_2 , CO , Ges.-C, HCN) werden im Raum unterschiedliche Arten von Messinstrumenten verbaut. Zur Beantwortung der zu Beginn gestellten Fragen sind neben der optischen Bewertung des Brandes Messungen von ausgewählten und aussagekräftigen Parametern entscheidend.

Die Positionen der Messstellen sind in Abbildung 20 und Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Aufzählung der Messstellen (Eigene Darstellung, 2021)

TK 1	Thermokette 1, am Regal
TK 2	Thermokette 2, Raummitte
TK 3	Thermokette 3, am Fenster
TK 4	Thermokette 4, am Stockbett
TF	Thermokette, im Fenster*
P1	Druck, Raummitte, 20 cm unter der Decke
P2*	Druck, obere Fensterhälfte
P3*	Druck, untere Fensterhälfte
SB	Abgassonde beweglich, Raummitte, inkl. Thermoelement (T-Sonde)
SO	Abgassonde oben, am Fenster, 195 cm Höhe
SU	Abgassonde unten, am Fenster, 150 cm Höhe
K	Kameras (2x innen, 2x außen)
	Initialbrand (Isopropanolwanne)

* Nur bei Versuch 1 und 2

Thermoelemente

Zur Temperaturmessung werden vier Thermoketten (TK) aus jeweils sechs Thermoelementen (TE) verbaut (siehe Tabelle 6). Bei den ersten beiden Versuchen wird zusätzlich eine TK mit drei TE am Fenster verbaut, worauf in den letzten beiden Versuchen bei geschlossenem Fenster verzichtet wurde. Des Weiteren wurde in der beweglichen Sonde ein TE verbaut. Bei den verwendeten TE handelt es sich um den Typ Nickelchrom und Nickel Typ K, Klasse 1. Sie haben einen Messbereich von -270 °C bis +1.372 °C. Eine Auflistung der vier Thermoketten ist in der folgenden Tabelle 6 zu sehen.

Tabelle 6: Höhe der Thermoelemente der Thermoketten (Eigene Darstellung, 2021)

Höhe in cm \ TK	40	80	120	160	200	240
Thermokette 1	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6
Thermokette 2	T 7	T 8	T 9	T 10	T 11	T 12
Thermokette 3	T 13	T 14	T 15	T 16	T 17	T 18
Thermokette 4	T 19	T 20	T 21	T 22	T 23	T 24

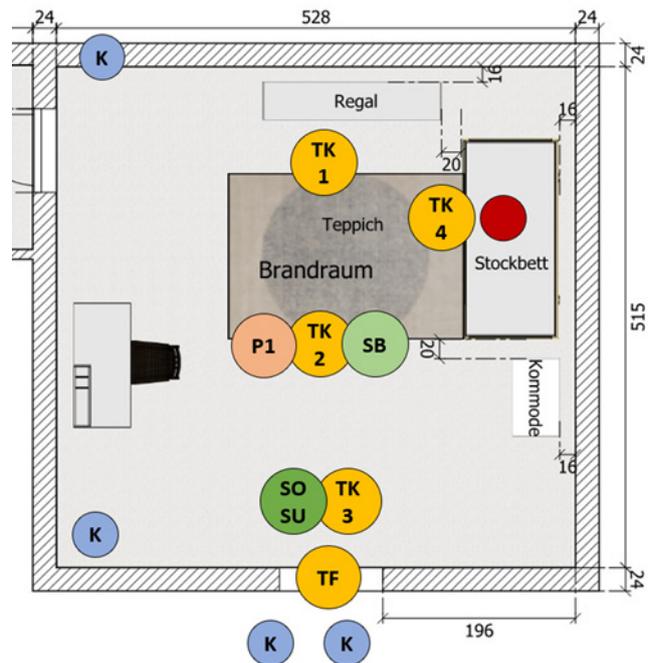


Abbildung 20: Standorte der Messstellen (Eigene Darstellung, 2021)

Die Höhe der Thermolemente an der Thermokette Fenster (TF) betrug 150 cm (TF1), 175 cm (TF2) und 195 cm (TF3) über Fußbodenkante. Diese Positionen bildeten die untere (TF1) und obere (TF3) Fensterhälfte sowie den mittleren Bereich (TF2) ab.

Die Maximalfehler der verwendeten Thermolemente des Typs K lassen sich aus den Datenblättern des Herstellers entnehmen. Im Temperaturbereich zwischen -40 °C bis $+375\text{ °C}$ beträgt die Grenzabweichung $\mp 1,5\text{ K}$. Bei einem Temperaturbereich von $+375\text{ °C}$ bis $+1.000\text{ °C}$ beträgt die Grenzabweichung $\mp 0,004 \cdot [t]$. Das entspricht bei einer gemessenen Temperatur von 1.000 °C einem Bereich zwischen 996 °C und 1.004 °C . Die Grenzabweichung ist bei Temperaturen von mehreren hundert Grad C aufgrund der prozentual kleinen Abweichung vernachlässigbar.

Abgasmessung

An drei Positionen wird eine Abgas- und Sauerstoffmessung durchgeführt. Zwei Sonden sind in 80 cm Abstand zum Fenster im Raum platziert. Die „Sonde unten“ ist inmitten der unteren Fensterhälfte positioniert, die „Sonde oben“ ist inmitten der oberen Fensterhälfte. Damit sollen in den beiden Versuchen mit geöffnetem Fenster die unterschiedlichen Abgasströme gemessen werden. In der Raummitte ist eine Sonde („Sonde beweglich“) installiert, die von der Messwarte aus gesteuert werden und verschiedene Höhen abfahren kann.

Eine der drei Abgasmessungen wird durch die FFB durchgeführt. Das Messgerät der FFB kann kontinuierlich CO , CO_2 und O_2 messen. In den ersten beiden Versuchen ist dieses Messgerät mit der „Sonde beweglich“ verbunden, im dritten Versuch mit der „Sonde unten“.

Die beiden anderen Messungen werden durch einen externen Dienstleister durchgeführt. Bei diesen werden im 10-Sekunden-Intervall kontinuierlich CO , CO_2 und O_2 gemessen. Am Messpunkt „Brandraumsonde oben“ wird zusätzlich kontinuierlich die „Gesamt-C“-Konzentration gemessen. Des Weiteren wird die HCN-Konzentration diskontinuierlich innerhalb eines gewissen Zeitrahmens am Messpunkt „Sonde oben“ gemessen. Bei den ersten beiden Versuchen werden die Abgase an den Positionen „Sonde oben“ und „Sonde unten“ gemessen. Beim dritten Versuch wird die Messung der „Sonde oben“ und „Sonde beweglich“ vom Dienstleister übernommen.

Druck

Zur Messung der Druckdifferenz zwischen Raum und Umgebung (Versuchshalle mit teils geöffnetem Tor) wird eine bidirektionale Sonde (p1) im Brandraum installiert (s. Abbildung 21). Sie wird in der Mitte des Raums 20 cm unter der Decke montiert. Zudem werden zwei bidirektionale Sonden im geöffneten Fenster installiert. Mit Hilfe der bidirektionalen Sonde im Raum kann eine Aussage über den Druckanstieg während des Brandverlaufs getroffen werden. Mittels der im Fenster installierten Sonden kann aus den dadurch gewonnenen Druckdifferenzmessungen unter Einbeziehung der lokalen Temperatur die Strömungsgeschwindigkeit der in den Raum ein- und ausströmenden Gase auf Grundlage der Bernoulli-Gleichung berechnet werden.

Die Vorder- und Rückseite der bidirektionalen Sonden werden, je nach Position in der Strömung, in eine „Upstream-“ und „Downstream-Seite“ eingeteilt. Von den beiden Seiten der bidirektionalen Sonde zweigt jeweils ein Rohr ab. Diese Rohre werden zu einem Differenzdruckaufnehmer geführt. Im Brandversuch wurde dies über Kupferrohre im wärmebeaufschlagten Bereich und Plastikschläuche im kühleren Bereich umgesetzt. Der auf der „Upstream-Seite“ entstehende Überdruck sowie der auf der „Downstream-Seite“ entstehende Unterdruck lenken die Membran des Differenzdruckmessers aus. Diese Auslenkung wird in ein zum Druck proportionales elektrisches Signal umgewandelt [39].

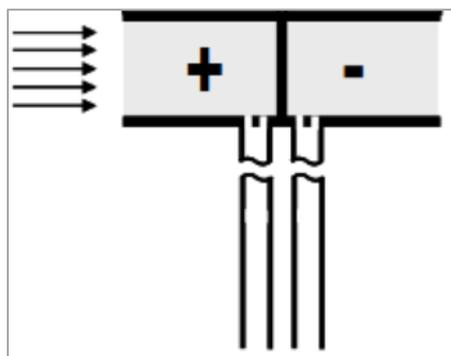


Abbildung 21: Schnitt durch bidirektionale Sonde mit Überdruck- und Unterdruckseite sowie den zum Differenzdruckmesser führenden Rohren [39].

Brandraumwaage

Zur Gewichtsbestimmung liegt der Brandraum auf einer Waage auf. Die Waage besteht aus vier Druckkraftaufnehmern der Firma HBM vom Typ C1/2 m. Ziel der Messung ist die Ermittlung der Abbrandrate (siehe *Kapitel 3 Grundlagen*).

Messsoftware

Für die Softwareanbindung der Messtechnik werden die Ausgangsleitungen der Messgeräte an das Datenerfassungsgerät (DAQ) der Firma Omega angeschlossen und mit dem Messrechner verbunden. Für die Datenauswertung wird das Messprogramm „Datenerfassung- und Datenverarbeitungssoftware DASyLab V. 13.0 Omega“ genutzt.

Kamerasystem

Zusätzlich zur Messtechnik werden mehrere Kameras im und um den Brandraum installiert. Die im Brandraum befindlichen und in einer wassergekühlten Box verbauten IP-Kameras können über ein LAN-Kabel direkt mit der Messwarte verbunden und dort aufgezeichnet werden. Für die Versuche werden zwei Kameras im Brandraum und zwei Kameras außerhalb des Brandraums aufgestellt (siehe Abbildung 20).

Sicherheitsvorkehrungen

Wie in *Kapitel 3 Grundlagen* beschrieben, kann bei einem Brand unter Sauerstoffmangel eine hohe Menge an unverbrannten Pyrolysegasen auftreten. Im schlimmsten Fall könnte sich das gesamte Raumvolumen von rund 60 m³ mit einem explosionsfähigen Gasgemisch anfüllen. Dadurch besteht die Möglichkeit der Entstehung eines Backdrafts, also einer schlagartigen Rauchgasentzündung mit großem Druckanstieg, der zu einer Beschädigung des Brandraums führen kann. Um den dritten und vierten Versuch jederzeit sicher stoppen zu können, werden zwei Löschanlagen im Brandraum verbaut.

In der Raummitte wird ein Spritzrohr mit mehreren Wassernebellöschdüsen auf dem Boden installiert, das über die Hochdruckwassernebellöschanlage (100 bar) der Firma Callies den Raum abkühlen soll. Die Löschanlage (Abbildung 22) kann über eine Fernsteuerung von der Messwarte aus gesteuert werden. Des Weiteren wird eine Löschlanze, auch als „Fognail“ bezeichnet, durch die neben der Tür



Abbildung 22: Löschanlage (CALLIES, ohne Datum)

befindliche Wand geführt. Diese sorgt für zusätzliche Sicherheit, falls der Wassernebel

nicht ausreichen sollte oder die Hochdruckwassernebellöschanlage nicht wie gewünscht funktioniert.

Um das Fenster jederzeit öffnen zu können, wird die vor dem Fenster befindliche Metallplatte über Ketten mit dem Hallenkran verbunden. Der Hallenkran kann über eine Fernsteuerung aus der Messwarte bedient werden.

5 Ergebnisse Raumbrandversuche

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse der Raumbrandversuche ausgewertet und diskutiert.

5.1 Versuch 1

Der erste Versuch wurde am 29.09.2021 im Brandraum in der Brandversuchshalle an der FFB durchgeführt. Die Isopropanolwanne unter dem Bett wurde durch einen Mitarbeiter entzündet, im Anschluss wurde die Tür zum Brandraum geschlossen. Das Fenster blieb während des Versuchs geöffnet. Die Temperatur im Raum betrug zu Beginn $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Tabelle 7 und die Abbildung 23 bis Abbildung 33 stellen wichtige Ereignisse des Brandverlaufes sowohl visuell als auch erläuternd dar.

Tabelle 7: Zeitliche Brandverlaufsdarstellung Versuch 1

Phänomen	Zeitpunkt	Beurteilungsgrundlage
Zündung Isopropanol	00:00 min	Video
Entzündung Matratze	ca. 00:40 min	Video
Übergreifen 2. Stock des Betts	ca. 01:10 min	Video
Bett in Vollbrand	ca. 01:50 min	Video
Rauchsicht maximal abgesenkt	ca: 02:35 min	Video
Entzündungen in austretenden Rauchgasen	Ca. 03:40 min	Video
Rollover im Fenster	Ca. 04:00 min	Video
Raum in Vollbrand	ca. 07:00 min	Video/ Temp. Verlauf
Fenster lichtet sich, Gleichgewicht hat sich eingestellt	Ca. 07:20 min	Video

Kamera innen	Kamera außen
Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen den Brand 1:00 min nach der Zündung.	
<u>1 min nach der Zündung:</u>	
<ul style="list-style-type: none"> • Matratze in Vollbrand • Brand geht auf zweites Stockwerk/ oberes Bett über • Bett (gesamt) fängt an zu brennen • Vergleichsweise stärkerer Temperaturanstieg bei TK 4 (s. Abbildung 34) • Bildung von Rauchsicht unter der Decke 	



Abbildung 23: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 24: Brandraumfenster nach 1:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen den Brand 2:00 min nach der Zündung.
2 min nach der Zündung:

- Brandausbreitung
- Rauchsicht sinkt ab
- Austreten von Rauchgasen/Brandrauch aus Fenster



Abbildung 25: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 26: Brandraumfenster nach 2:00 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen den Brand 2:30 min nach der Zündung.
2:30 min nach der Zündung:

- Rauchsicht bis in Bodennähe
- Brand wird erstickt/gedrosselt
- Rauchgase (unverbr. Kohlenwasserstoffe, Ruß) treten aus Fenster aus
- Verbrennungsluft ist nahezu verbraucht
- Erwartung von O₂-Minimum
- Temperaturmaximum an TK 4 (s. Abbildung 34, T19)



Abbildung 27: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 28: Brandraumfenster nach 2:30 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen den Brand ca. 5 min nach der Zündung.
5:00 min nach der Zündung:

- Die heißen Rauchgase haben Temperaturen oberhalb der Zündgrenze
 → Sobald Kontakt mit Umgebungsluft stattfindet, kommt es zur Zündung bzw. zu Regionen, in denen Rauchgase zünden
- Rauchgasdurchzündung (Rollover)



Abbildung 29: Brandraum nach ca. 5 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 30: Brandraumfenster nach ca. 5 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen den Brand 7:20 min nach der Zündung.
7:20 min nach der Zündung:

- Übergang zu Rauchgasdurchzündung (Flashover) im Raum (keine schwarzen Rauchgase)
- Raum in Vollbrand
- Brandlastgesteuerter Brand



Abbildung 31: Brandraum nach 7:20 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 32: Brandraum nach 7:20 min (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 33 zeigt den Raum nach dem Brandversuch

- Nur nichtbrennbare Rückstände auf dem Boden
- Brandraumwände nicht mit Ruß beaufschlagt



Abbildung 33: Brandraum nach Versuch 1 (Eigene Darstellung, 2022)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 34) ist der Temperaturverlauf der Thermokette 4 direkt am Doppelstockbett dargestellt. Die Abszissenachse stellt die Zeit in Minuten dar und die Ordinatenachse die Temperatur in Grad C. Der zeitliche Beginn der Kurve markiert den Zeitpunkt der Entzündung. Somit zeigt sich, dass etwa eine Minute nach der Entzündung des Isopropanols die Temperatur deutlich ansteigt und etwa nach 2:30 min ihr Maximum mit fast 1100 °C erreicht. Dies stimmt mit dem Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzung am Doppelstockbett überein.

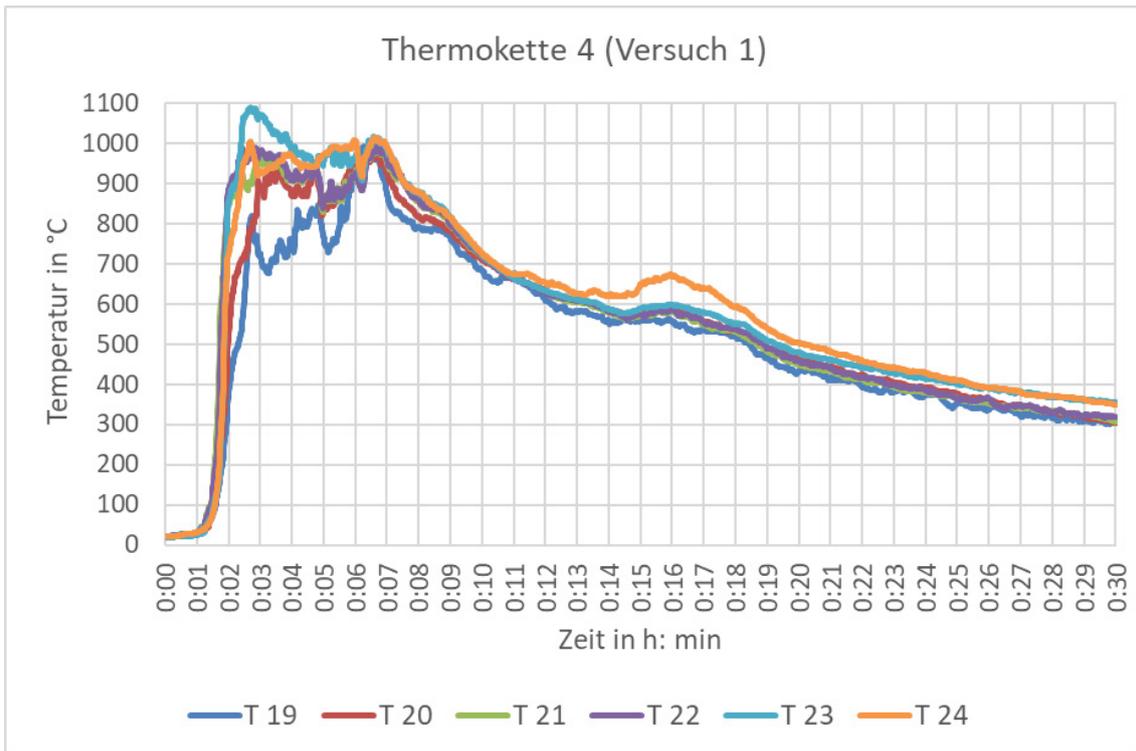


Abbildung 34: Thermokette 4 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

In der folgenden Zusammenstellung sind die Temperaturverläufe der Thermoketten TK 1 bis TK 3, Thermokette Fenster und Thermoelement Sonde zu sehen. Die Standorte der Temperaturmesspunkte und die Höhe der einzelnen Thermoelemente sind im Kapitel *Thermoelemente* erläutert.

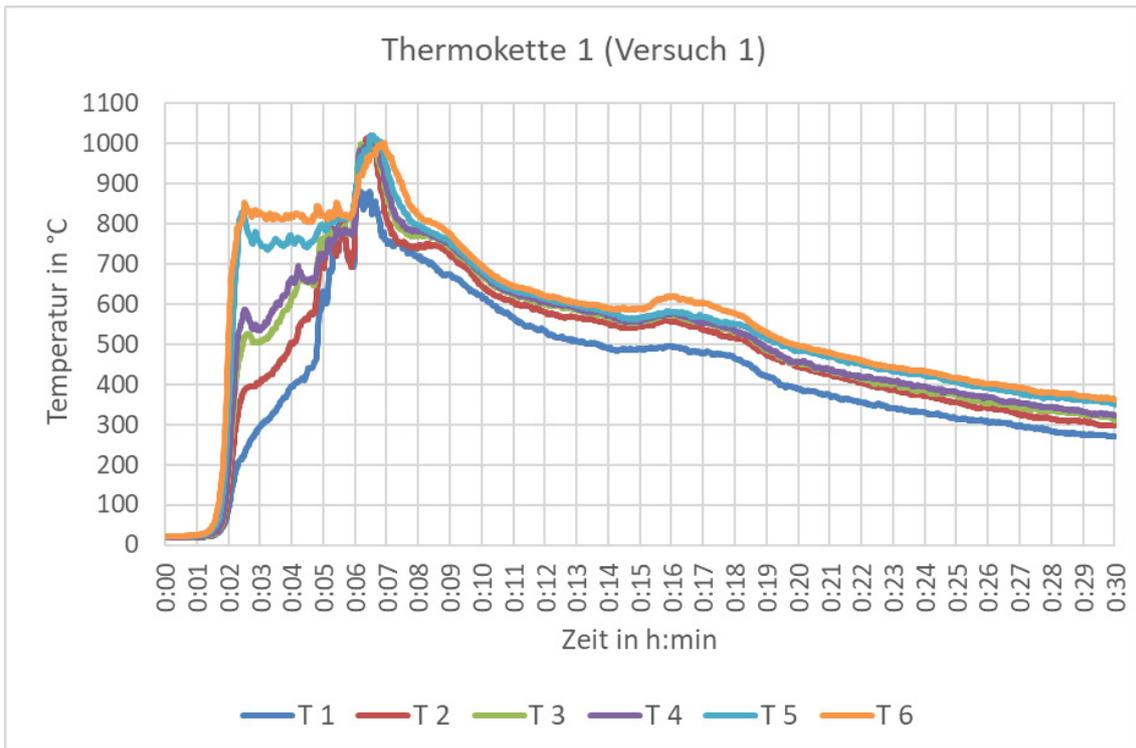


Abbildung 35: Temperaturverlauf TK 1 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

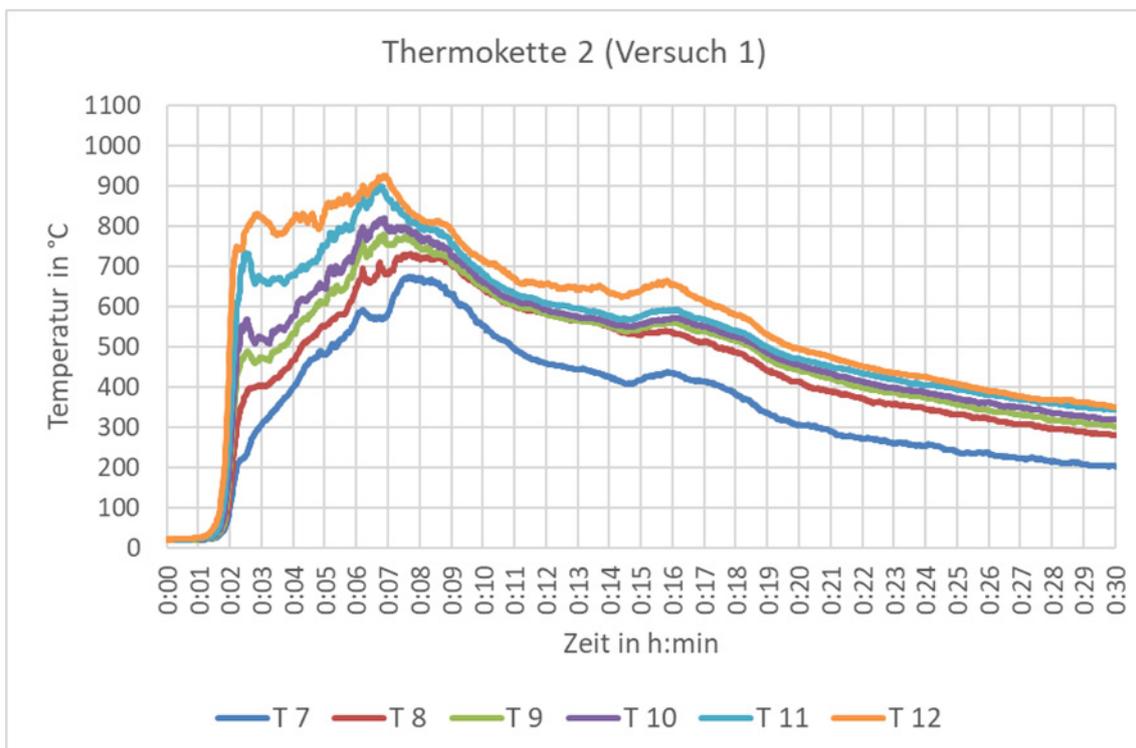


Abbildung 36: Temperaturverlauf TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

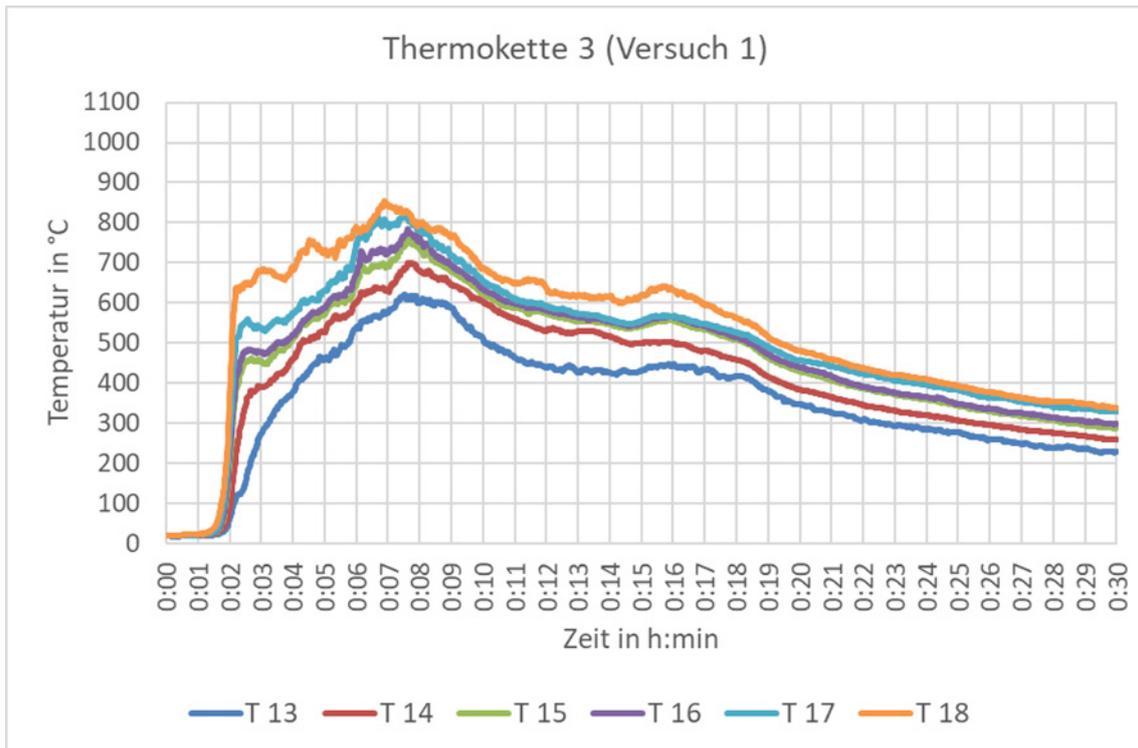


Abbildung 37: Temperaturverlauf TK 3 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Die Diagramme der im Raum befindlichen Thermoketten (Abbildung 34 bis Abbildung 37) weisen ähnliche Verläufe auf, wobei natürlich lokale Unterschiede durch die Positionen der Messstellen einen Einfluss auf die maximalen Temperaturen haben. Etwa eine Minute nach der Brandinitialisierung unterhalb des Stockbetts ist an der angrenzenden Messstelle, TK 4, ein deutlicher Temperaturanstieg auf mehr als 1000 °C zu verzeichnen. Rückzuführen ist dies auf die Matratze und deren Materialeigenschaften. Parallel dazu kommt es im gesamten Raum zu einem deutlichen Temperaturanstieg mit Höchstwerten von etwa 800 °C. Durch die hohe Freisetzung an Abgasen (siehe Abbildung 28) kommt es zu einer Verdrängung des in den Raum einströmenden Luftsauerstoffs im Bereich der Ventilationsöffnung. Dadurch kommt es zur Unterventilation des Brandes, welcher in seiner Intensität und Ausbreitungsgeschwindigkeit eingeschränkt wird. Dies zeichnet sich deutlich einheitlich im gesamten Raum an den Temperaturverläufen ab. So nehmen etwa zwei Minuten nach dem Initialbrand die Temperaturen ab oder bilden, je nach Messstelle, ein Plateau. Während die Temperaturen der direkt am Bett positionierten Thermoelemente (TK 4) abnehmen, weisen die am Regal (TK 1) und die in der Raummitte (TK 2) positionierten Thermoelementketten im Bereich der Rauchsicht relativ homogene Temperaturen auf, mit Trend zum Anstieg. Aufgrund der hohen Brandintensität ist keine klare Abgrenzung der Schichten möglich, jedoch sind die

genannten Thermoelemente im Deckenbereich eine Indikation dafür. Die Temperaturhöchstwerte verzeichnen alle Temperaturmessstellen zwischen der sechsten und achten Minute nach der Brandinitialisierung. Grund hierfür ist die Abnahme der Brandlast und die einhergehende Reduzierung der Menge an Pyrolyse- und Rauchgasen. Die Menge an einströmender Frischluft erhöht sich, was zu einer saubereren Verbrennung führt; damit einher gehen höhere Temperaturen, was sich auch mit den Videoaufnahmen der aus dem Fenster steigenden Flammenfront und Rauchgase deckt. Nach diesem Peak kommt es zu einer einheitlichen Temperaturabnahme im Raum (Abnahme der Brandlast), welche nach etwa 15 Minuten durch einen erneuten Temperaturanstieg unterbrochen wird. Auf den Kamerabildern ist eine Zunahme der Rauchentwicklung auf der Raumseite des Schreibtischs zu erkennen. Da beide Innenkameras zu diesem Zeitpunkt bereits defekt waren, ist davon auszugehen, dass es zu einer Brandzunahme am Schreibtisch gekommen ist, beispielsweise durch zuvor verdeckte und nun nochmals aufflammende Brandlast. Dafür spricht, dass zwar über jede Thermokette im Raum ein Anstieg verzeichnet wurde, jedoch überwiegend an den Messpunkten in Deckennähe (TK 1 und TK 4) wie auch im Bodenbereich (TK 2). Die in der Raummitte positionierte Thermokette TK 2 weist den geringsten Abstand zum Schreibtisch auf und hat somit über die gesamte Messhöhe, vor allem aber auch im Bodenbereich, einen größeren Temperaturanstieg. Die weiter entfernten Thermoketten sind zwar auch durch die Wärmestrahlung beeinflusst, der Einfluss der konvektiven Wärmeübertragung ist hierbei jedoch größer, weshalb auch der Anstieg im Deckenbereich erhöht ist. Nach dem erläuterten späten Anstieg klingt der Brand ab und der Brandraum kühlt einheitlich herunter.

In der folgenden Abbildung (Abbildung 38) ist der Druckverlauf der Differenzdruckmessung, sowie die gemittelte Temperatur der TK2, im Raum zu sehen.

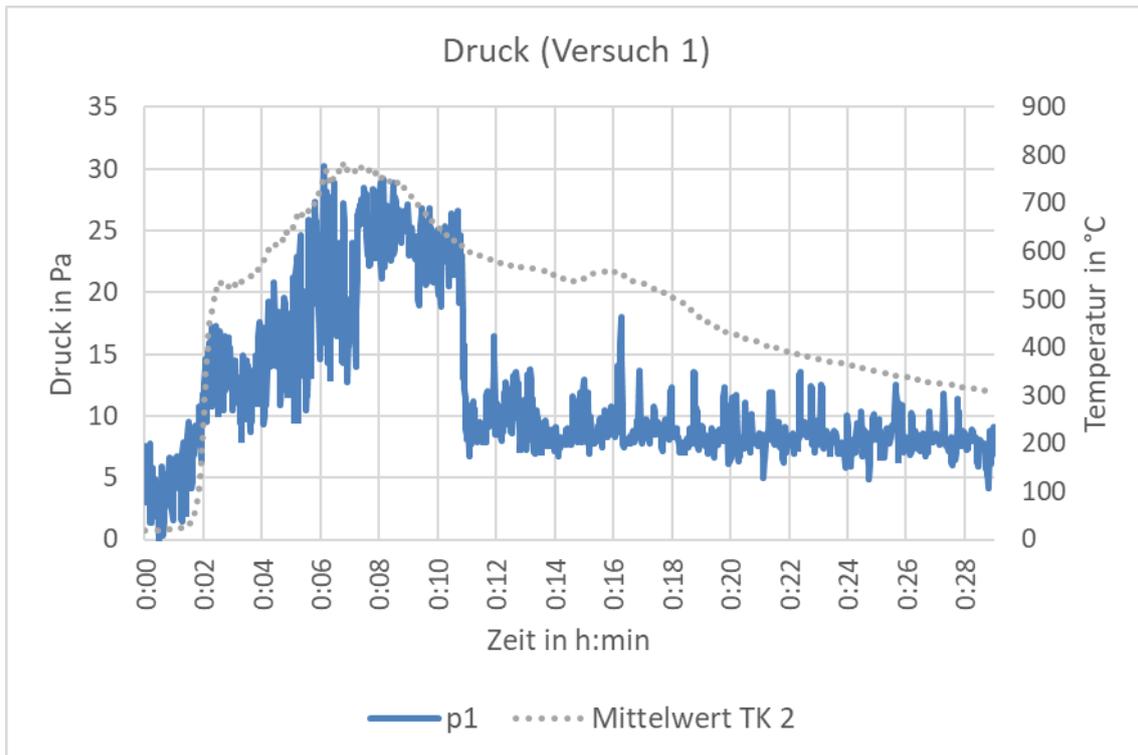


Abbildung 38: Druckverlauf im Raum geglättet (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Auf dem Diagramm ist zu erkennen, dass der Druck analog zur Temperatur bei Maximalwerten von ca. 25 Pa steigt. Der Grund für den Druckanstieg liegt darin, dass die zur Temperatur proportionale Volumenzunahme (Gesetz von Gay-Lussac) und somit die Druckzunahme der im Raum befindlichen Gase nicht ausgeglichen werden kann. Die Ausströmfläche der Ventilationsöffnung (Fenster) ist nicht ausreichend groß, um die enormen Mengen an Rauchgasen abzuführen. Hierdurch sammeln sich die Rauchgase im Zimmer und der Druck steigt an.

Auf dem Diagramm ist zu erkennen, dass es bei der Messung zu großen Schwankungen gekommen ist. Bei einer Druckmessung sind leichte Schwankungen nicht auszuschließen, diese starken Veränderungen lassen jedoch auf ein Messproblem schließen.

Abbrand

Durch die Lagerung des Brandraums auf einer Waage wurde die Masse und die bei einer Verbrennung einhergehende Abnahme gemessen. Abbildung 39 stellt den Verlauf der Massenabnahme in Verbindung mit der Temperaturentwicklung im Raum dar. Als Temperaturreferenz wird die gemittelte gemessene Temperatur der zentral befindlichen TK 2 verwendet.

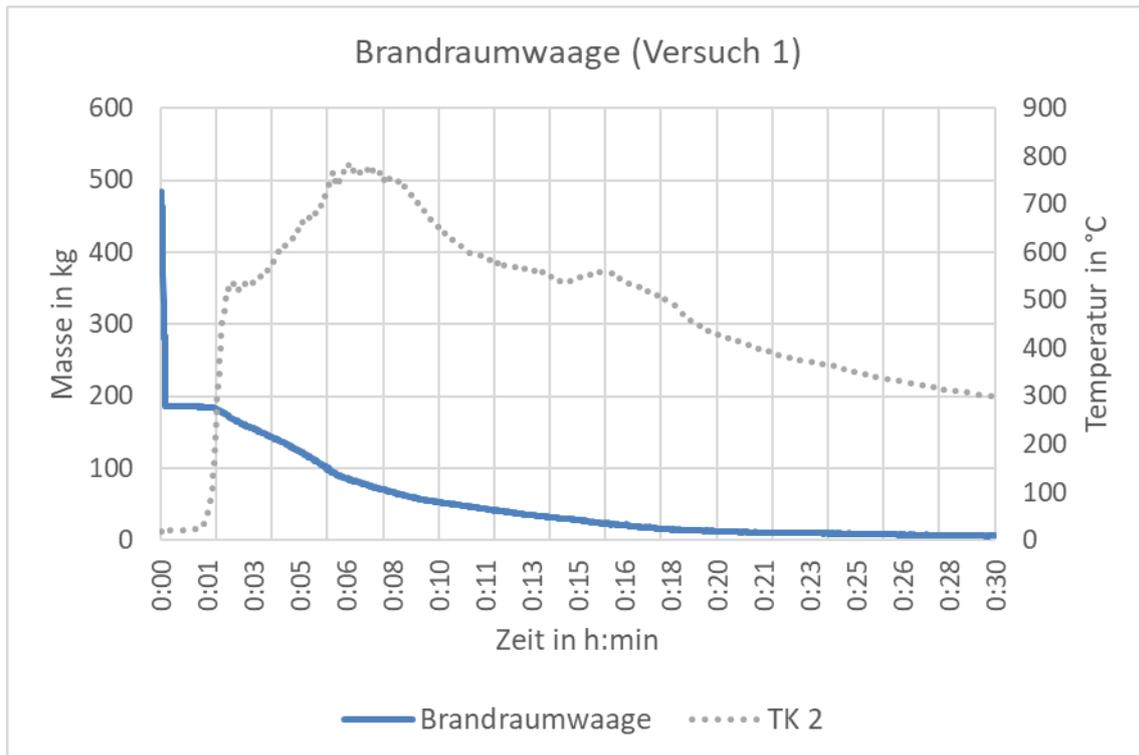


Abbildung 39: Brandraumwaage und mittlerer Temperaturverlauf von TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 39 zeigt den Beginn der Massenabnahme mit dem deutlichen Anstieg der Temperatur etwa eine Minute nach Entzündung. Der unterventilierte Zustand zeichnet sich in beiden Kurven ab, wenn auch in der Temperaturkurve deutlicher. Etwa zwei Minuten nach der Entzündung stagniert der Temperaturanstieg und es bildet sich ein Plateau. Die ansonsten für den Abschnitt der Vollbrandphase annähernd konstante Massenabnahme flacht an diesem Punkt kurzzeitig ab. Mit Überschreitung der maximalen Temperaturen etwa sechs Minuten nach Entzündung flacht auch die Massenabnahmekurve ab und nähert sich dem Punkt der vollständigen Umsetzung aller brennbaren Stoffe an.

Temperaturen und Druck im Fenster

Abbildung 40 stellt die Temperaturentwicklung im Bereich des Fensters dar. Gemessen wurde auf drei verschiedenen Höhen, TF1 (150 cm), TF2 (175 cm) und TF3 (195 cm). Ausgewählt wurden diese Messpositionen, um die Temperaturen der ein- und ausströmenden Kalt- und Heißgase zu messen. Darüber hinaus sind diese Messwerte wichtig, um mit den, an den gleichen Positionen angebrachten,

bidirektionalen Sonden eine Aussage über die Strömungsgeschwindigkeiten treffen zu können.

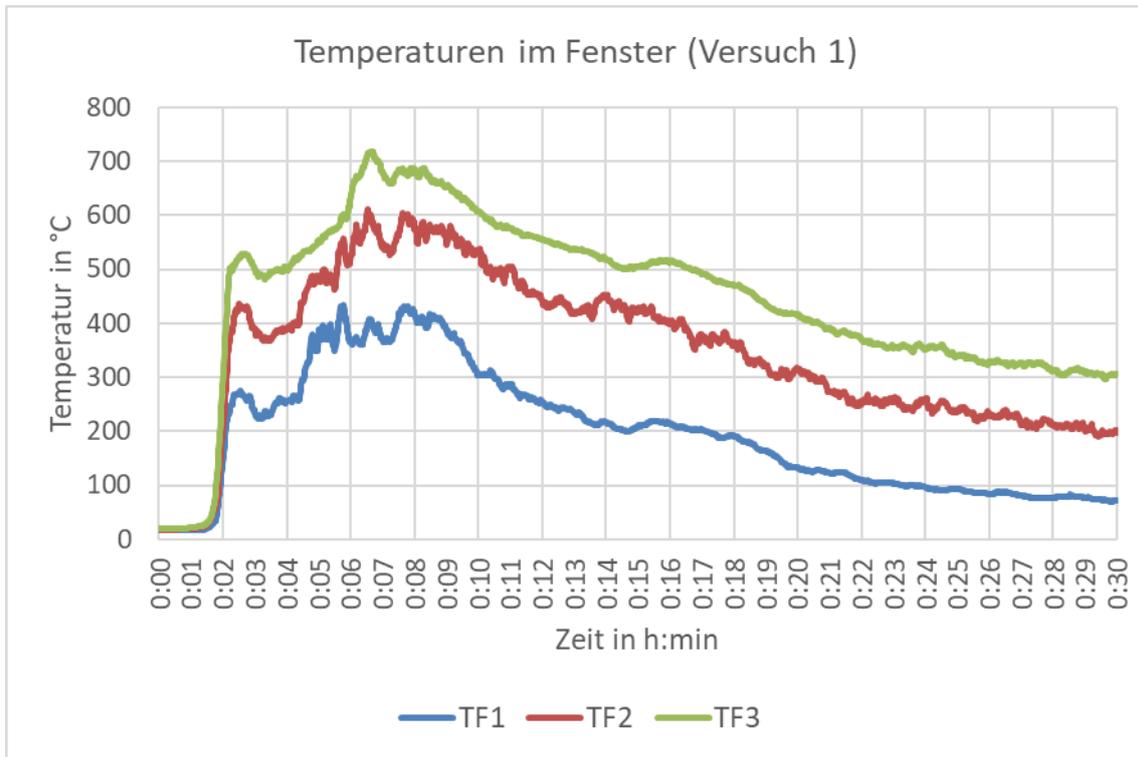


Abbildung 40: Temperaturverlauf der im Fenster positionierten Thermoelemente TF1 (untere Fensterhälfte), TF2 (mittig) und TF3 (obere Fensterhälfte) (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 40 zeigt einen deutlichen Temperaturanstieg, der etwa 1:30 min nach der Entzündung beginnt. Auffällig ist der parallele Temperatureinbruch nach dem ersten lokalen Maximum. Dieser Verlauf deckt sich mit den im Raum gemessenen Verläufen, wenn auch die Temperaturen aufgrund des Kaltlufteinflusses und der annähernd außerhalb des Raums liegenden Position natürlich unterhalb der Raumtemperatur liegen. Mit dem Absinken der Rauchsicht kommt es zum Temperatureinbruch und der Brand geht in den unterventilierten Zustand über. Durch die voranschreitende Verbrennung des Stockbetts kommt es zu einem annähernd kontinuierlichen Temperaturanstieg, welcher bei etwa 4 min durch einen Temperatursprung an der unteren (TF1) und mittleren (TF2) Messstelle unterbrochen wird. Grund für diesen Anstieg, bei TF1 etwa 30 °C, sind die ersten Zündungsphänomene in den aus dem Brandraum austretenden und in Frischluftkontakt kommenden Pyrolysegase. Die im oberen Fensterbereich ausströmenden Pyrolysegase haben zu diesem Zeitpunkt eine Temperatur von etwa 500 °C. In diesem Temperaturbereich sind Rauchgas-komponenten wie Schwefelwasserstoff zündfähig (Zündtemperatur: 220 °C) [19].

Weitere Komponenten sind aufgrund der Zündtemperatur zu diesem Zeitpunkt nahe an der Zündung (Zündtemperaturen: CO (feucht): 605 °C; HCN: 535 °C; Benzol: 555 °C) [11] [20]. Kurze Zeit später (ab 4:20 min) kommt es zum Rollover, der sich über nahezu die gesamte Fensterfläche erstreckt. An den Temperaturverläufen zeichnet sich dies vor allem im unteren und mittleren Fensterbereich durch einen steilen Temperaturanstieg von jeweils annähernd 100 °C ab. Die austretenden Gase waren nun durch den Brand und die umgebenden Bauteile soweit aufgeheizt, dass diese zündfähig sind, über lokal begrenzte Phänomene wie bspw. „Dancing angels“ hinaus. Das Temperaturmaximum nach etwa 6:30 min deckt sich mit der Temperaturentwicklung im Brandraum. Die Temperaturschwankungen von TF1 und TF2, besonders im Zeitraum von etwa 6:00 bis 8:00 min, resultieren aus dem pulsierenden Austritt der Flammen sowie der einströmenden Frischluft. Mit abnehmender Brandintensität stellt sich im Bereich des Fensters wieder eine eindeutigere Schichttrennung ein und die Temperatur wird konstanter und nimmt auf allen drei Messhöhen ab. Der Temperaturanstieg bei 14:30 min wurde an anderer Stelle bereits erläutert.

Abbildung 41 zeigt den Druckverlauf im Fenster. Die Messstelle p2 befindet sich im oberen Bereich des Fensters, p3 im unteren Bereich. Der Druckanstieg mit zunehmender Temperatur (Abbildung 40) zeichnet sich deutlich ab. Im Bereich des Temperaturmaximums werden maximale Differenzdruckwerte von etwa 8 Pa erreicht. Die Druckmessung zeigt, dass im oberen Bereich des Fensters (p2) aufgrund des Überdrucks konstant Rauchgase ausströmen. Der untere Messbereich (p3) liegt teils im Übergangsbereich, auch neutrale Ebene genannt, zwischen den beiden Strömungsebenen. Gemessen wird vor allem der Staudruck des Brandraums bis etwa acht Minuten nach der Entzündung. Danach nimmt der Druck ab und nähert sich dem Nullpunkt an. Aufgrund der Messungengenauigkeit ist eine Aussage über eine Umkehrung der Druckverhältnisse durch einströmende Frischluft nur begrenzt möglich.

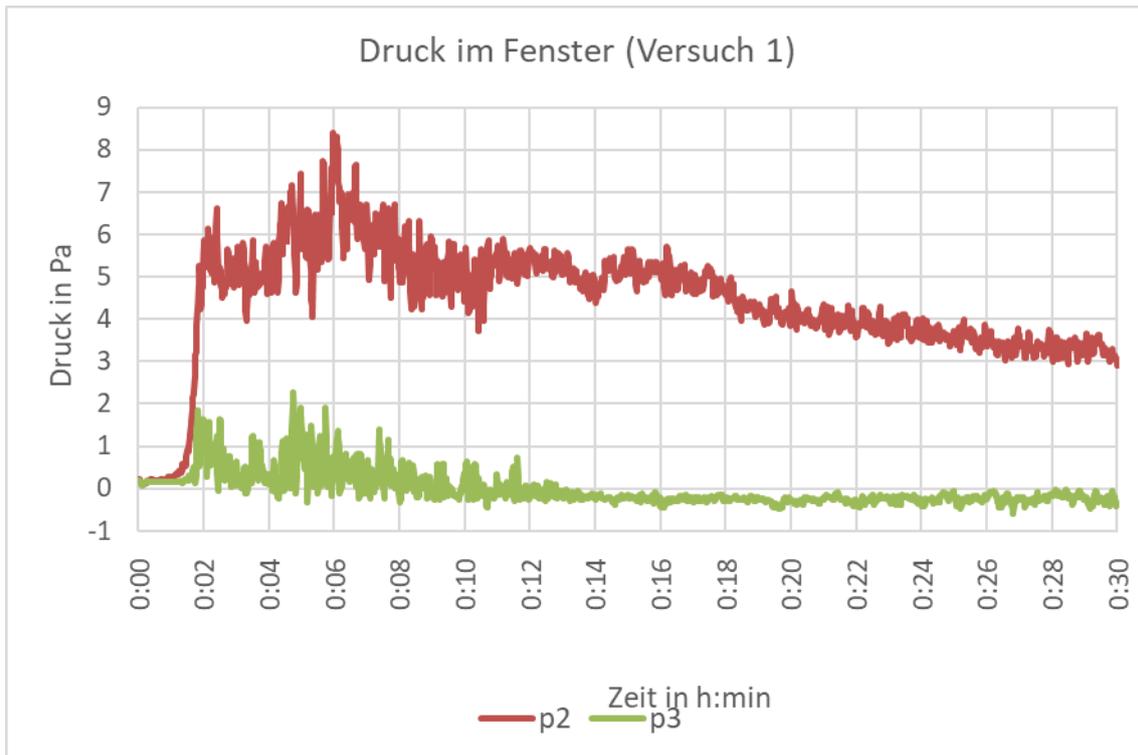


Abbildung 41: Druckverlauf im Fenster geglättet (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Gasgeschwindigkeit im Fenster

Mittels eines auf der Bernoulli Gleichung in Verbindung mit einem Korrekturfaktor basierten Excel-Tools von Dipl.-Ing. D. Max wurde die Gasgeschwindigkeit auf Grundlage des an gleicher Stelle gemessenen Differenzdrucks und der Temperatur iterativ berechnet. Die Ergebnisse werden in Abbildung 42 in Verbindung mit der mittleren Temperatur in der Raummitte (TK 2) dargestellt.

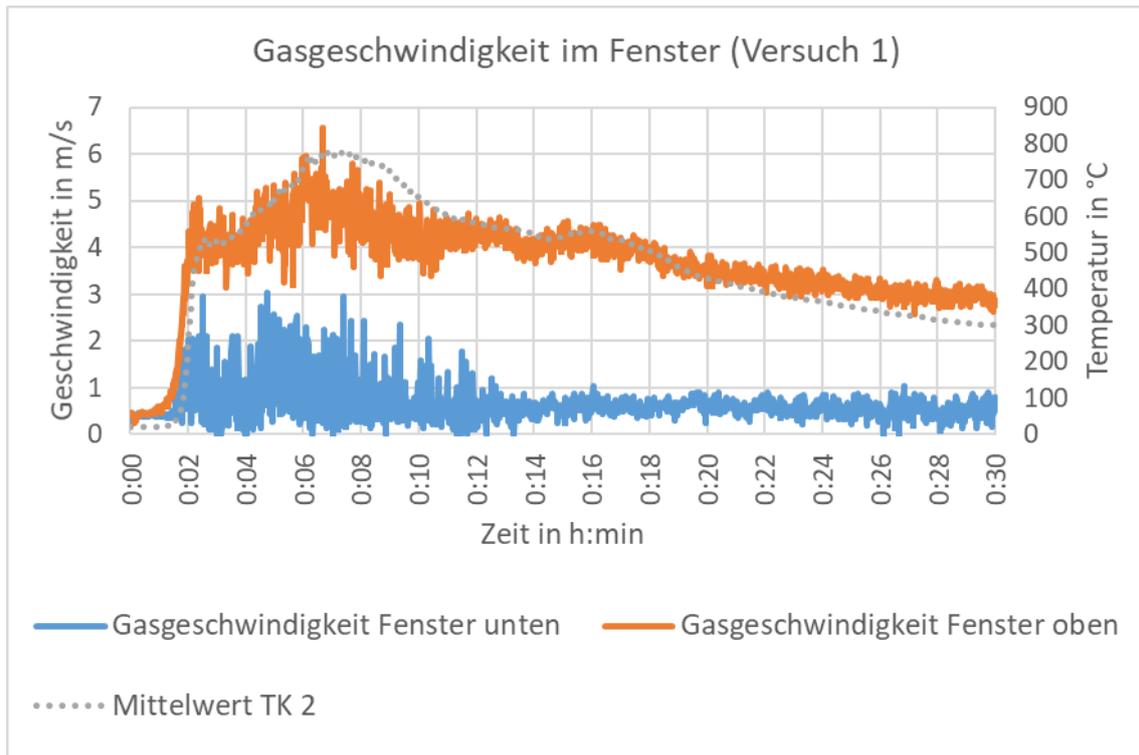


Abbildung 42: Gasgeschwindigkeiten in Ventilationsöffnung (Fenster) oben und unten und mittlere Temperatur von TK 2 (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 42 zeigt den Zusammenhang zwischen Gasgeschwindigkeit in der Ventilationsöffnung und Temperaturverlauf im Raum. Auffällig ist hierbei, wie deutlich die Korrelation im oberen Fensterbereich ist. Hierbei wird eine Gasgeschwindigkeit von über 5 m/s erreicht. Die Geschwindigkeitsdarstellung im unteren Fensterbereich ist von deutlichen Schwankungen geprägt. Dies lässt unter Berücksichtigung der Videoaufnahmen darauf schließen, dass, anders als geplant, die Messstelle nicht, bzw. nur begrenzt, im Bereich der einströmenden Frischluft lag. Bedingt durch die vergleichsweise niedrigeren Temperaturen im unteren Bereich (Abbildung 40) ist auch die Gasgeschwindigkeit geringer. Auffällig ist, dass sich mit Abnahme des Brandes keine negative Gasgeschwindigkeit einstellt, sondern eine Annäherung an die etwas über 0 m/s liegende Ausgangsgeschwindigkeit erfolgt. Dies deutet darauf hin, dass sich im Bereich der unteren Messstelle die neutrale Ebene zwischen den beiden Strömungsschichten befindet.

Gasmessung

In der folgenden Zusammenstellung (Abbildung 43 und Abbildung 44) sind die Ergebnisse der Abgasmessung dargestellt. Zusätzlich ist auch der mittlere

Temperaturverlauf der Thermokette 2 dargestellt. Es wird die Thermokette TK 2 verwendet, da sie im Gegensatz zu TK 1 und TK 4 keinen direkten Kontakt mit dem Feuer hatte. Bei den Messergebnissen von TK 3 am Fenster besteht die Möglichkeit der Beeinflussung des Messergebnisses durch Luftströmungen.

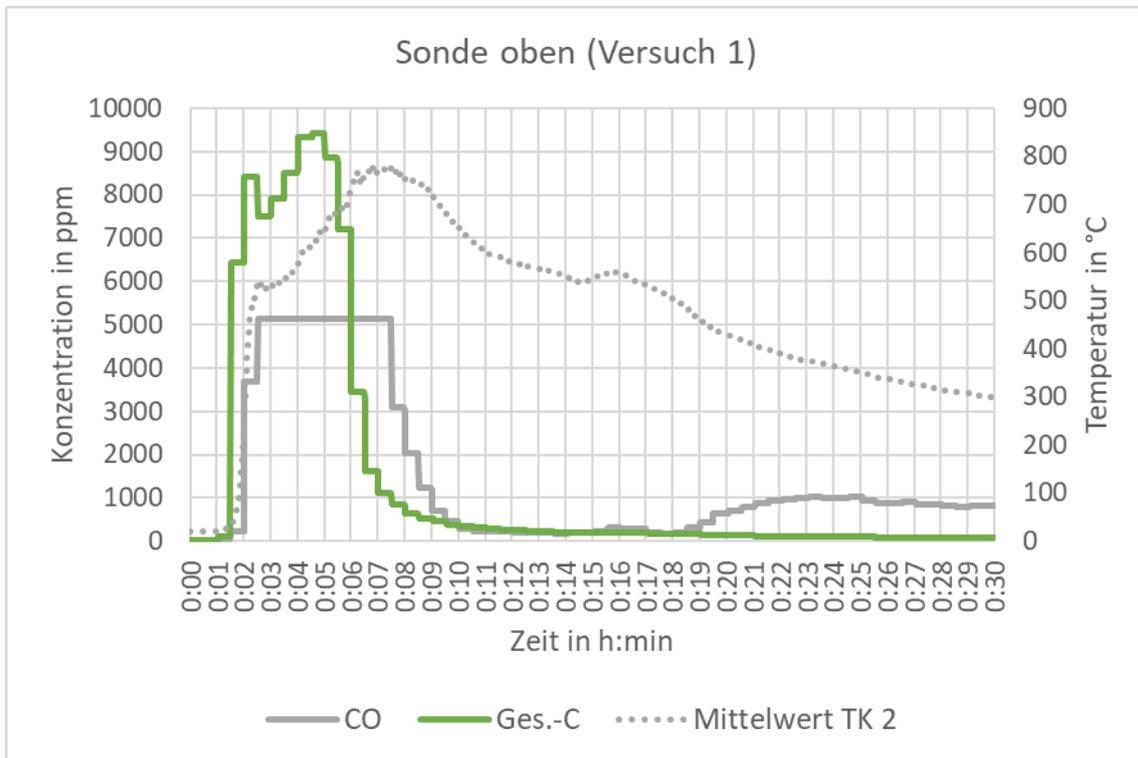


Abbildung 43: Sonde oben CO und Ges.-C (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

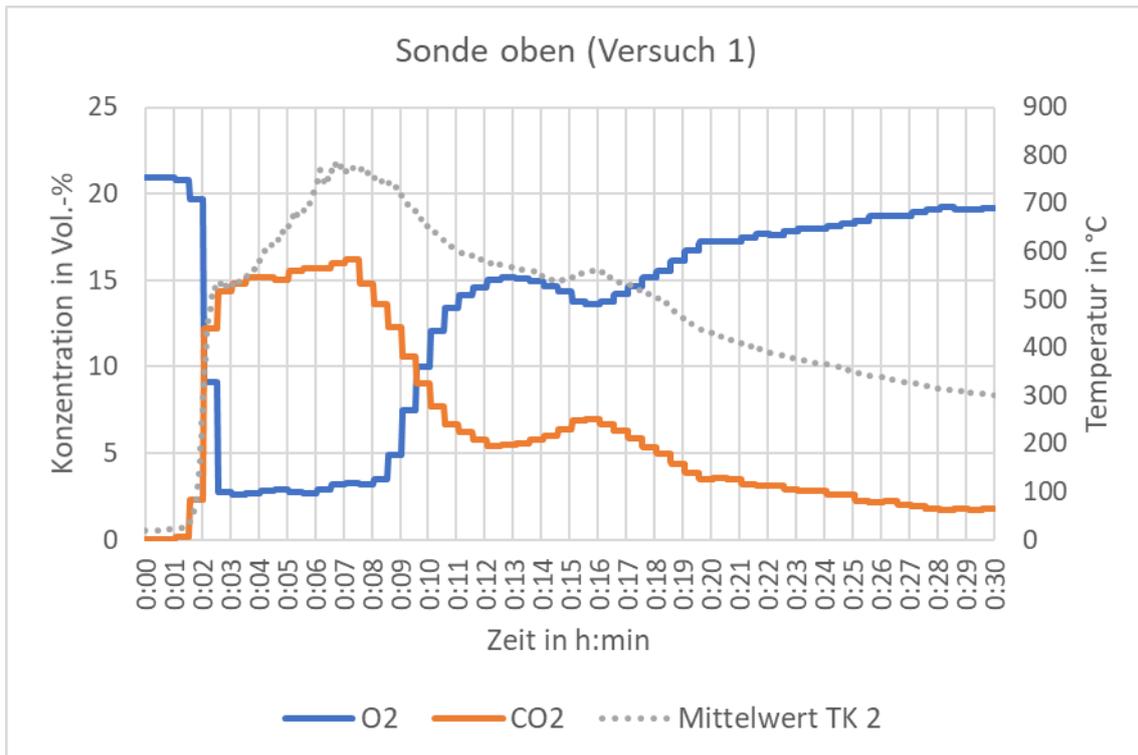


Abbildung 44: Sonde oben O₂ und CO₂ (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Das Diagramm Sonde oben O₂ und CO₂ (Abbildung 44) zeigt den Zusammenhang zwischen O₂ und CO₂. Sobald die Sauerstoffkonzentration fällt, steigt die CO₂-Konzentration an. Während der Raum in Vollbrand stand, blieb die O₂-Konzentration konstant auf ca. 2,5 Vol.-%. Es ist zu erkennen, dass etwa nach 2:30 min die Steigung des Temperaturverlaufs plateauartig abnimmt, während die Sauerstoffkonzentration auf unter 3 Vol.-% fällt. Dieser Punkt markiert den Wechsel vom brandlastgesteuerten zum ventilationsgesteuerten Brandregime.

Auf dem Diagramm Sonde oben (Abbildung 43) ist eine hohe CO- (max. 5.130 ppm) und Ges.-C-Konzentration (max. 9.360 ppm) zu sehen. Die hohe Gesamt-C-Konzentration ist hauptsächlich auf unverbrannte Pyrolysegase zurückzuführen, was auf ein ventilationsgesteuertes Brandregime schließen lässt. Der Temperatur- und Ges.-C-Konzentrationsverlauf sind bis etwa fünf Minuten nach Entzündung ähnlich. Die deutliche Abnahme der Ges.-C-Konzentration, einhergehend mit einem weiteren Anstieg der Temperatur bis zum Maximum, kann auf den zur Verfügung stehenden Sauerstoff in Verbindung mit einer Abnahme der Brandintensität zurückgeführt werden. Bedingt durch die hohe Menge an Pyrolysegasen ist das gemessene Gemisch zu fett zum sauberen Verbrennen, weshalb es zum großen Teil unverbrannt aus dem

Raum austritt. Eine Abnahme der Pyrolysegase durch Überschreitung des Maximums der thermischen Stoffzersetzung sorgt für eine Erhöhung der Luftsauerstoffkonzentration im Raum, somit für eine Entzündung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe und eine Oxidierung, einhergehend mit einem Anstieg der CO₂-Konzentration. Auch der Anstieg der CO-Konzentration ist ein Indikator für einen unterventilierten Brand. Technisch bedingt konnte bei den beiden ortsfesten Sonden nur eine maximale CO-Konzentration von 5.000 ppm gemessen werden. Mit der beweglichen Sonde wurden hingegen maximale CO-Werte von etwa 23.400 ppm gemessen. Beide Werte sinken nach etwa sieben Minuten wieder. In dieser Phase wechselt der Brand zurück in ein brandlastgesteuertes Brandregime.

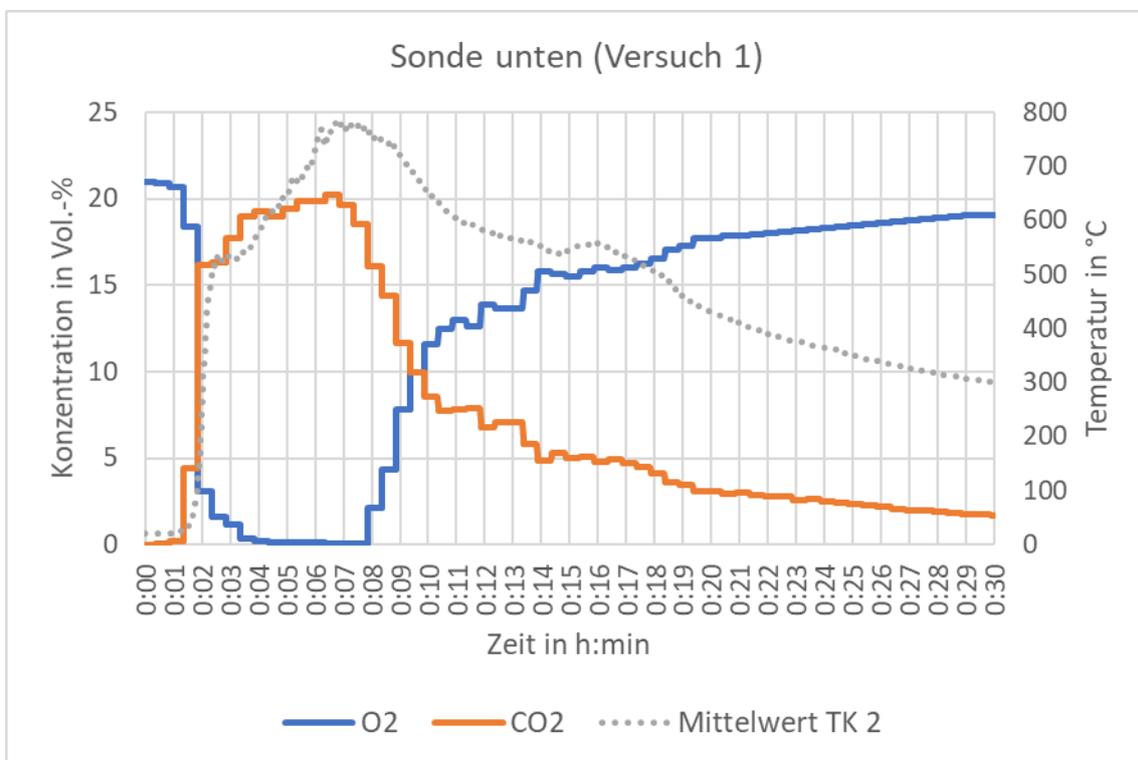


Abbildung 45: Sonde unten O₂ und CO₂ (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

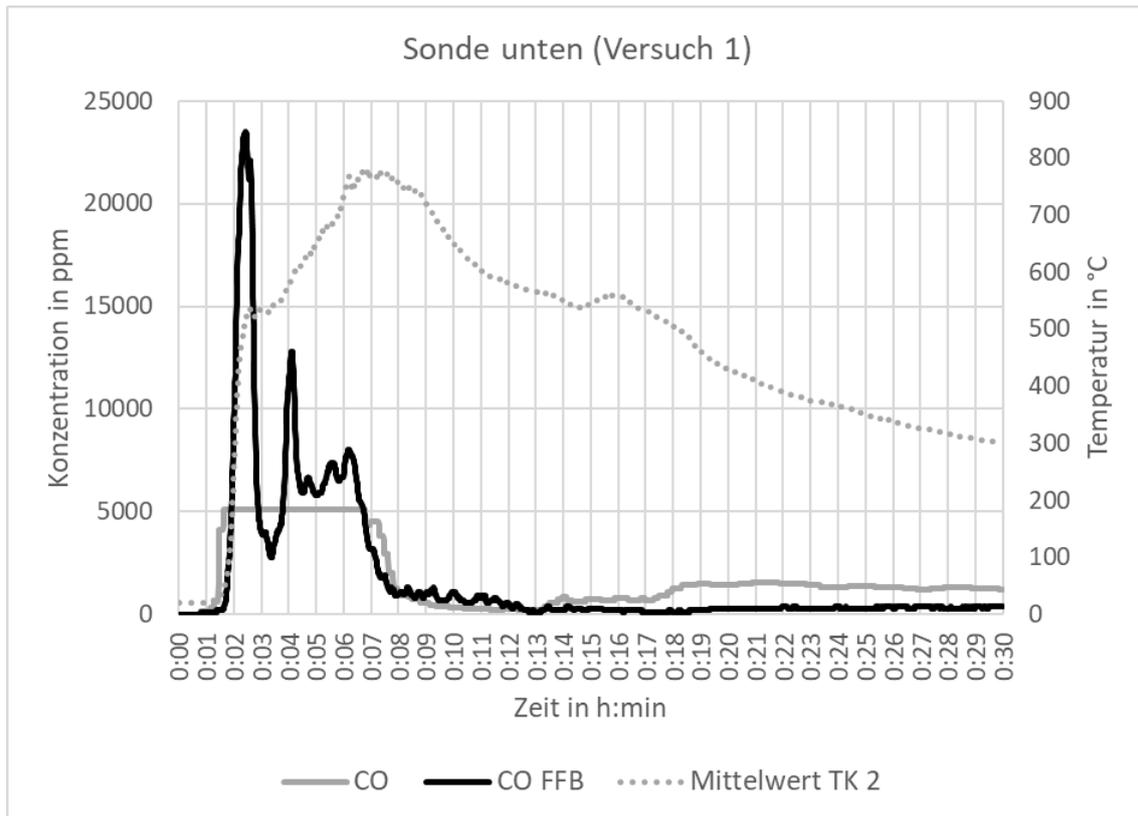


Abbildung 46: Sonde unten CO (Versuch 1, eigene Darstellung, 2022)

Auch auf dem Diagramm Sonde unten O₂ und CO₂ (Abbildung 45) zeigt sich der Zusammenhang zwischen O₂ und CO₂. An diesem Messpunkt wurden während der Vollbrandphase keine Anteile an reinem Sauerstoff gemessen, während die CO₂-Konzentration rund 20 Vol.-% betrug.

Das Diagramm Sonde unten CO (Abbildung 46) zeigt im Vergleich zur oberen Sonde einen ähnlichen Verlauf. Allerdings steigt bei der unteren Sonde die CO-Konzentration etwa eine Minute früher an und fällt rund eine Minute früher ab. Auch bei diesem Messpunkt konnte technisch bedingt eine maximale CO-Konzentration von 5.000 ppm gemessen werden. Die von der FFB durchgeführte CO-Messung an anderer Stelle zeigte einen Wert von über 23.500 ppm.

Die HCN-Konzentration wurde diskontinuierlich gemessen. Bei einer 31 min langen Probenentnahme betrug die Massenkonzentration 28,7 mg/m³.

Die dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass bei einem Zimmerbrand mit geöffnetem Fenster bereits nach 2 - 3 Minuten ein unterventilierter Zustand eintritt. Die daraus resultierenden Phänomene wie die Abnahme des Temperaturanstiegs und

größere Mengen an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen konnten nachgewiesen werden.

5.2 Vergleich zwischen Versuch 1 und 2

Der zweite Versuch bei geschlossenem Fenster wurde am 01.10.2021 an der FFB durchgeführt. Der Versuchsaufbau und der Initialbrand waren identisch zum ersten Versuch. Das Fenster blieb während des Versuchs dauerhaft geöffnet. Die Versuchsergebnisse werden nicht einzeln präsentiert, es findet ausschließlich ein Vergleich mit dem ersten Versuch statt.

Um die beiden Versuche zu vergleichen, wurde der arithmetische Mittelwert der sechs Thermoelemente jeder Thermokette berechnet und miteinander verglichen.

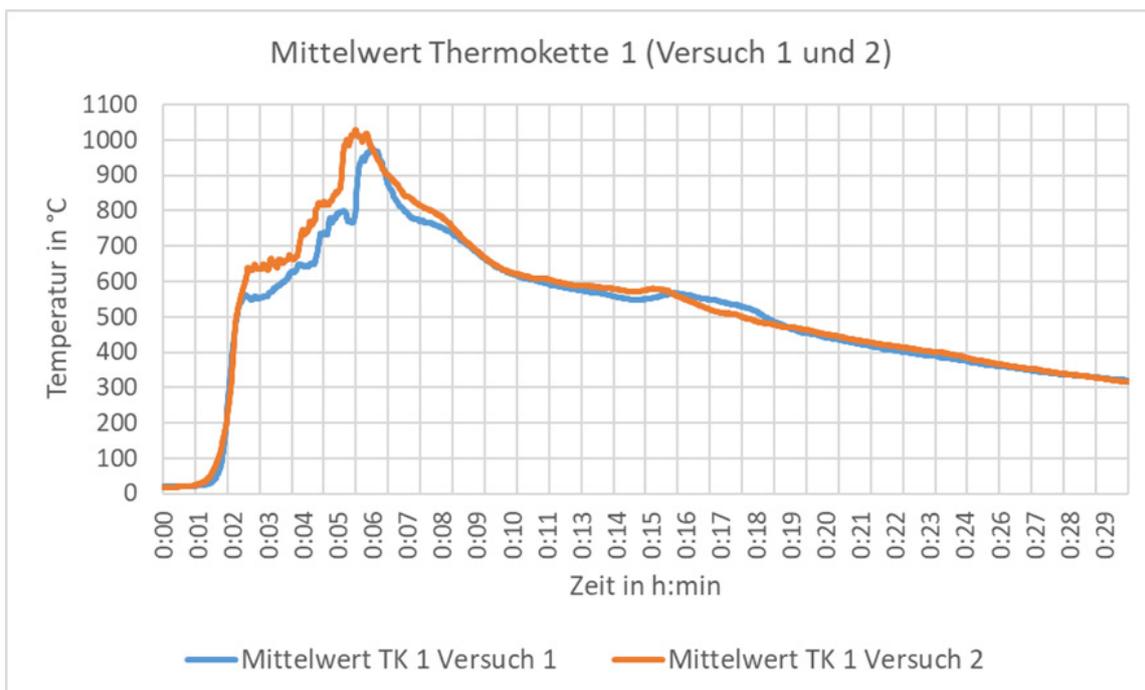


Abbildung 47: Vergleich Temperatur TK 1 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

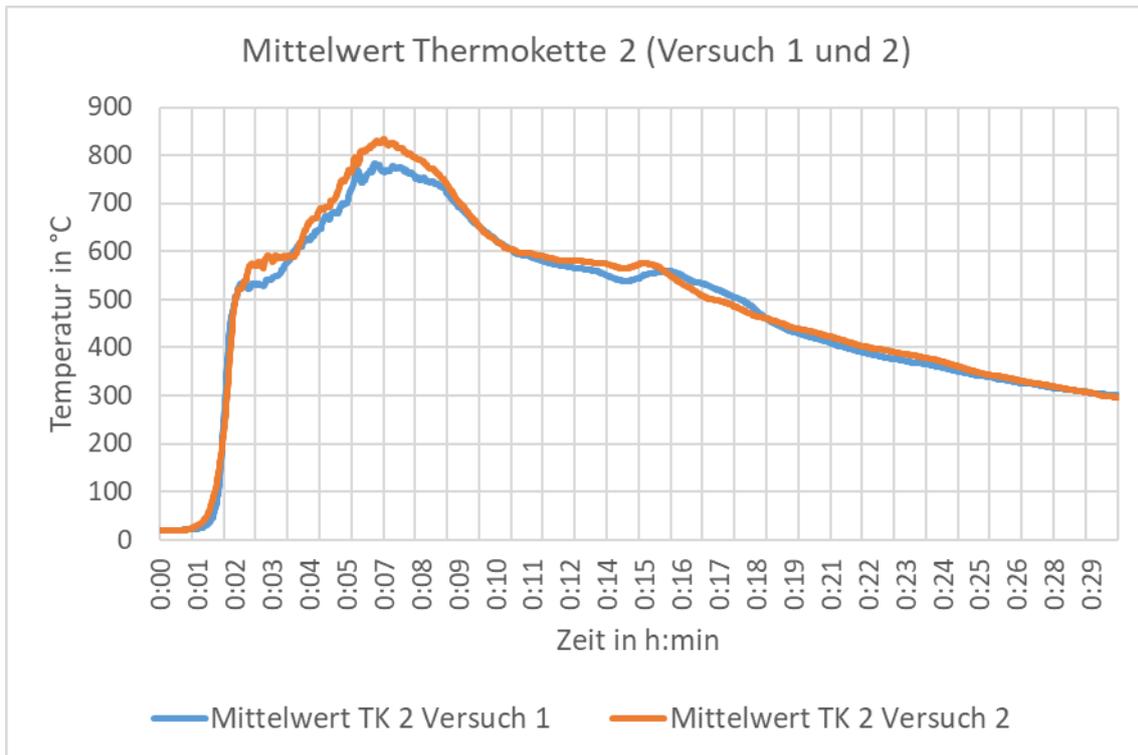


Abbildung 48: Vergleich Temperatur TK 2 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

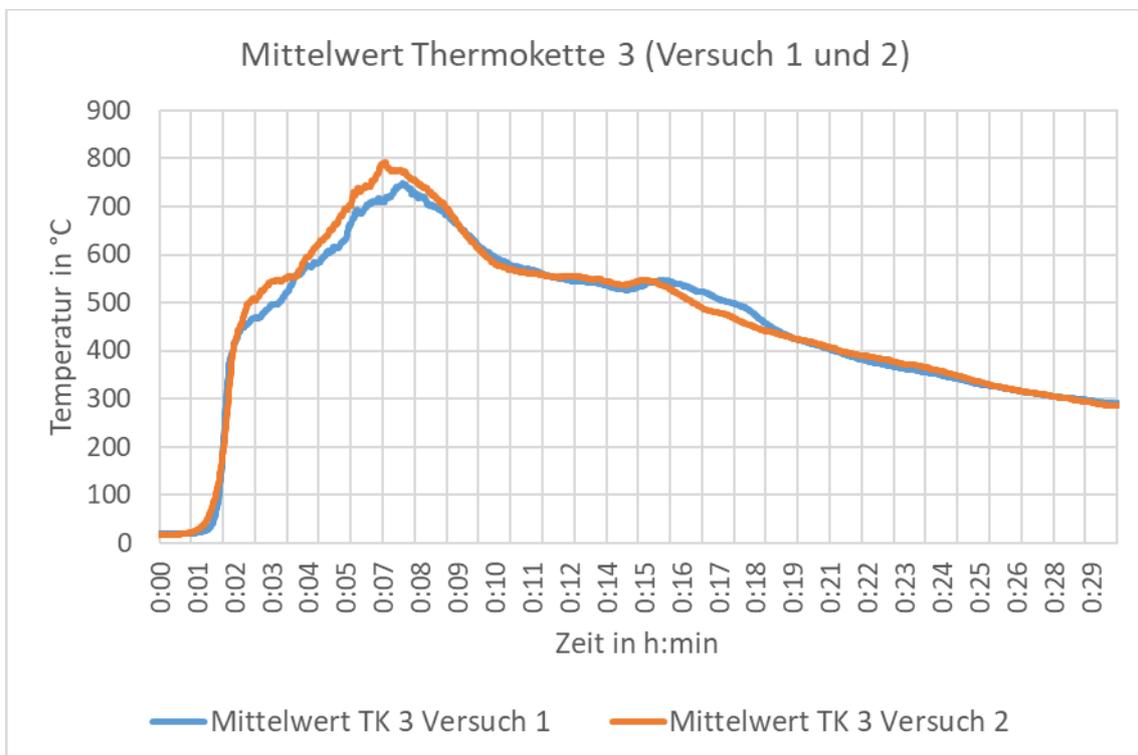


Abbildung 49: Vergleich Temperatur TK 3 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

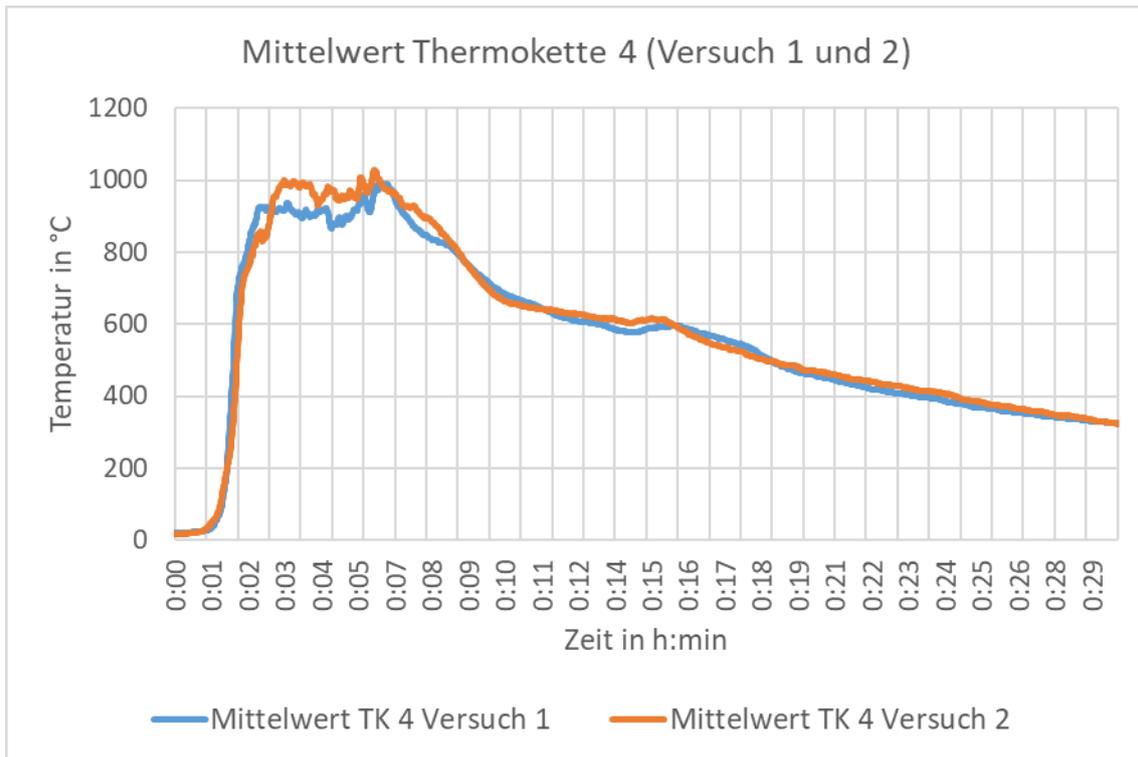


Abbildung 50: Vergleich Temperatur TK 4 (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

Auf den Diagrammen ist zu sehen, dass die jeweiligen Temperaturkurven beider Brandversuche ähnlich verlaufen. Im Versuch 2 steigt die Temperatur etwas früher an und erreicht eine höhere Maximaltemperatur.

In der folgenden Tabelle sind die Maximaltemperaturen der Mittelwerte zu sehen.

Tabelle 8: Maximaltemperaturen der Mittelwerte (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2021)

Thermokette \ Versuch	TK 1	TK 2	TK 3	TK 4
Versuch 1	980 °C	783 °C	749 °C	992 °C
Versuch 2	1.029 °C	833 °C	792 °C	1.027 °C
Differenz	49 °C	50 °C	43 °C	35 °C
Abweichung	5,0 %	6,4 %	5,7 %	3,5 %

Die Temperaturdifferenz liegt zwischen 35 °C und 50 °C. Im Verhältnis zur Gesamttemperatur ist das eine geringe Abweichung von maximal 6,4 %.

In den folgenden Diagrammen sind die Konzentrationsverläufe ausgewählter Gase an der oberen Sonde zu sehen.

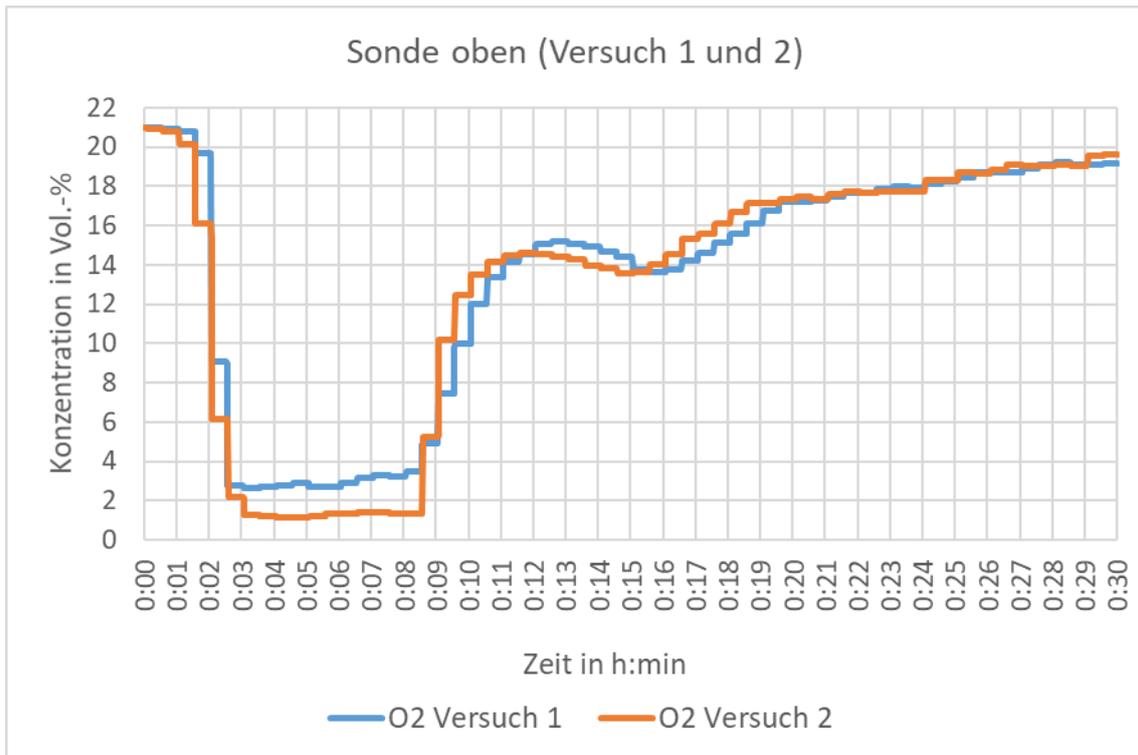


Abbildung 51: Vergleich O2-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

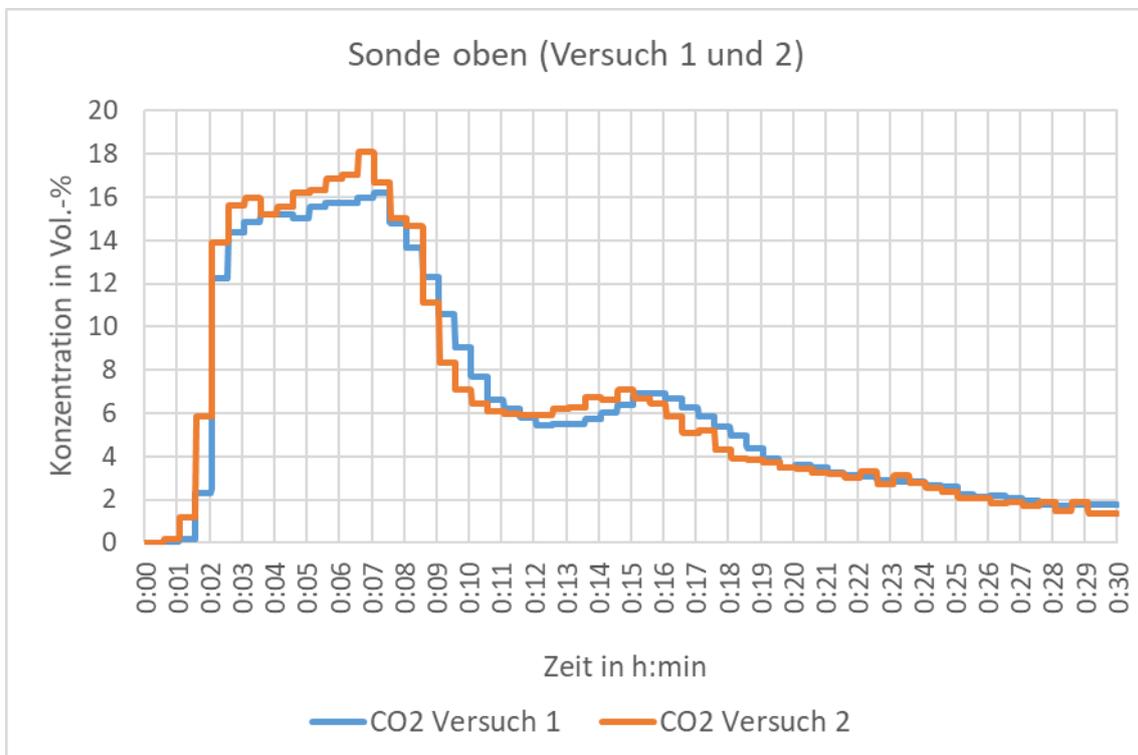


Abbildung 52: Vergleich CO2-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

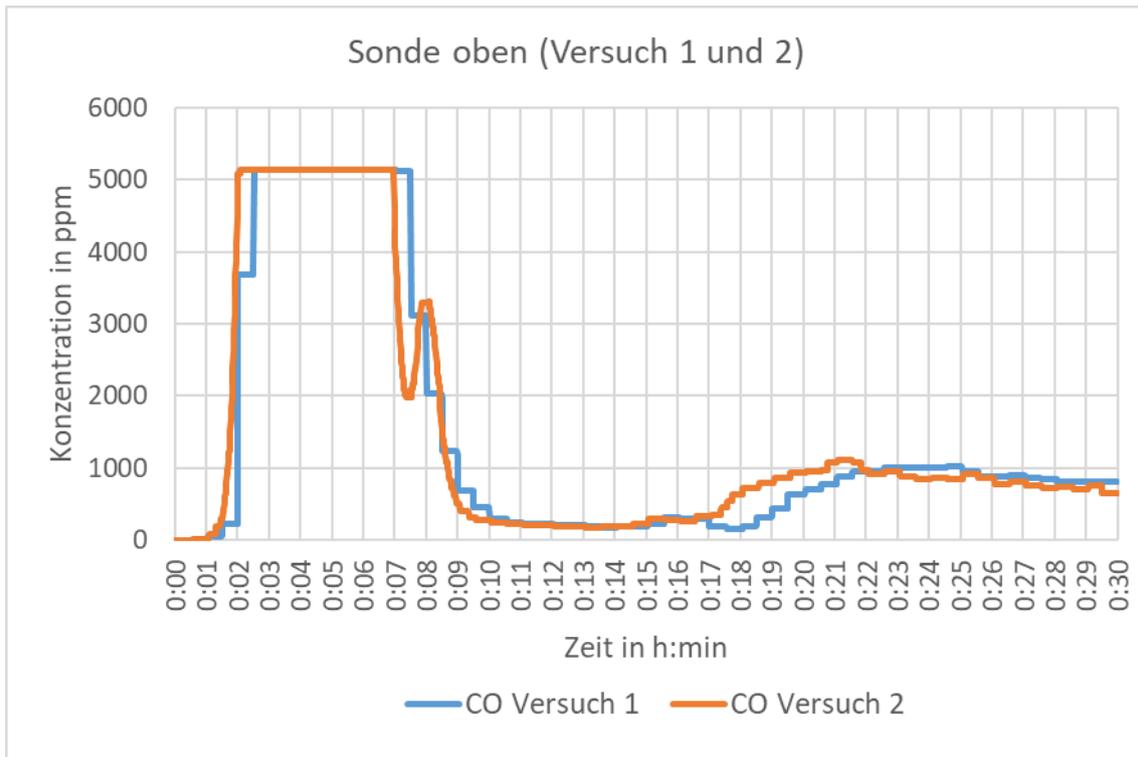


Abbildung 53: Vergleich CO-Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

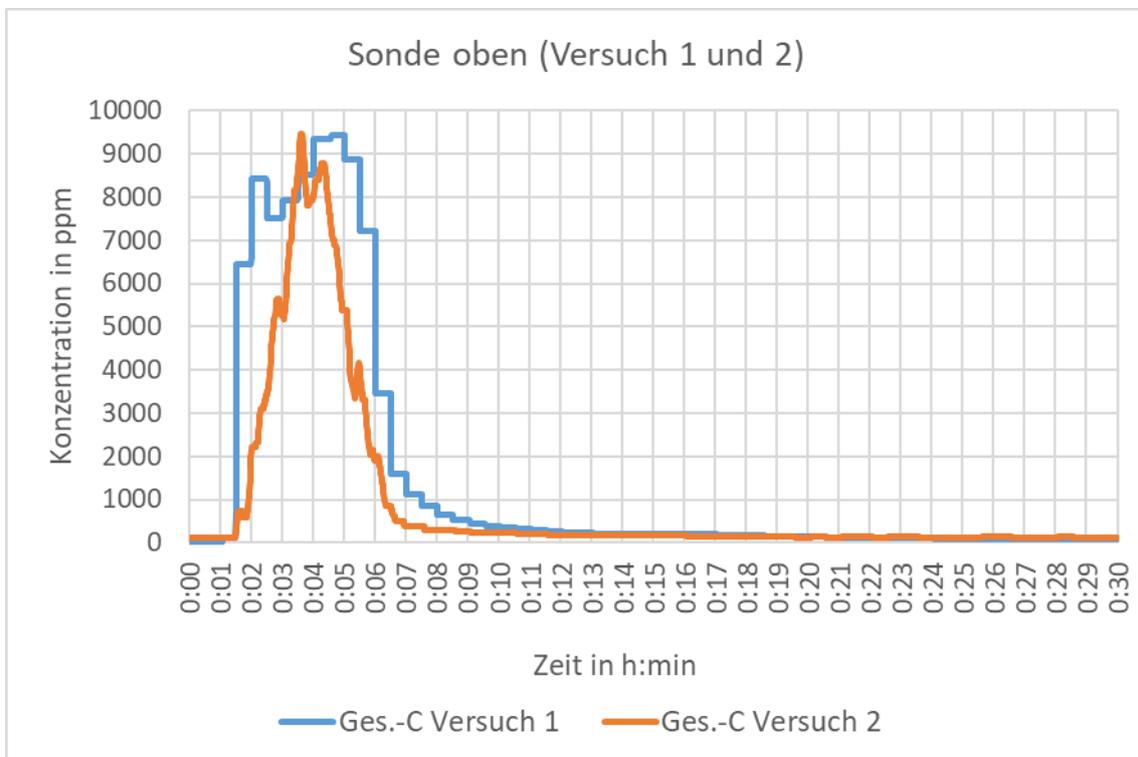


Abbildung 54: Vergleich Ges.-C Sonde oben (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

In den Diagrammen (Abbildung 51 bis Abbildung 54) ist zu erkennen, dass die Verläufe der Gasmessung ähnlich sind. Bei Betrachtung des ersten Diagramms (O_2) fällt auf, dass beim zweiten Versuch während der Vollbrandphase (ab 3. Minute) die Sauerstoffkonzentration etwas geringer ist. Dem vierten Diagramm (Ges.-C) ist zu entnehmen, dass bei Versuch 1 die Konzentration steiler ansteigt und länger auf einem hohen Niveau bleibt. Die Maximalwerte liegen jedoch bei beiden Versuchen im Bereich von etwa 9.500 ppm.

Im folgenden Diagramm Abbildung 55 ist der Vergleich der Druckverläufe zu sehen.

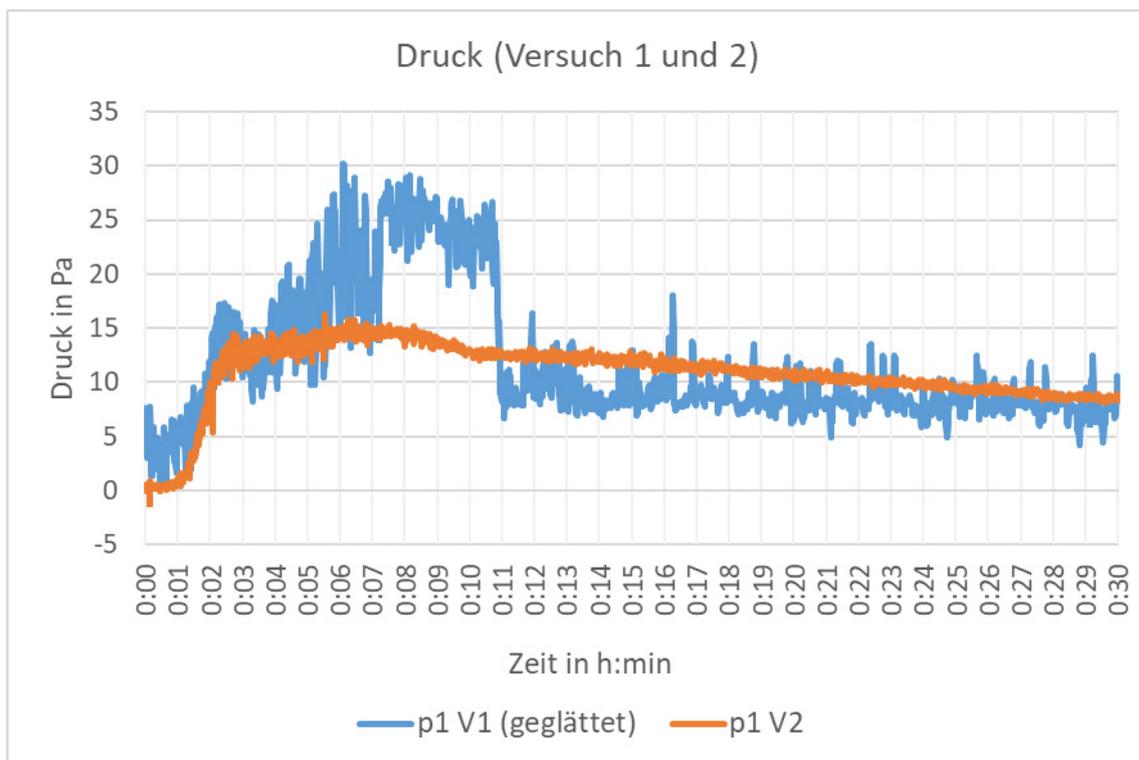


Abbildung 55: Druckverlauf im Raum (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 55 zeigt, dass die Druckschwankungen beim ersten Versuch deutlich größer sind als beim zweiten Versuch. Lässt man die, trotz Glättung, atypischen Schwankungen außer Betracht, fällt auf, dass die Verläufe bis zur 5. Minute und ab der 12. Minute ähnlich sind. Die Differenz von über 10 Pa zwischen 0:03 min und 0:10 min kann nicht plausibel erklärt werden, es ist von einer Messungenauigkeit auszugehen. Diese Annahme wird durch die Betrachtung der Abbrandwaage (siehe Abbildung 56) in beiden Versuchen unterstützt.

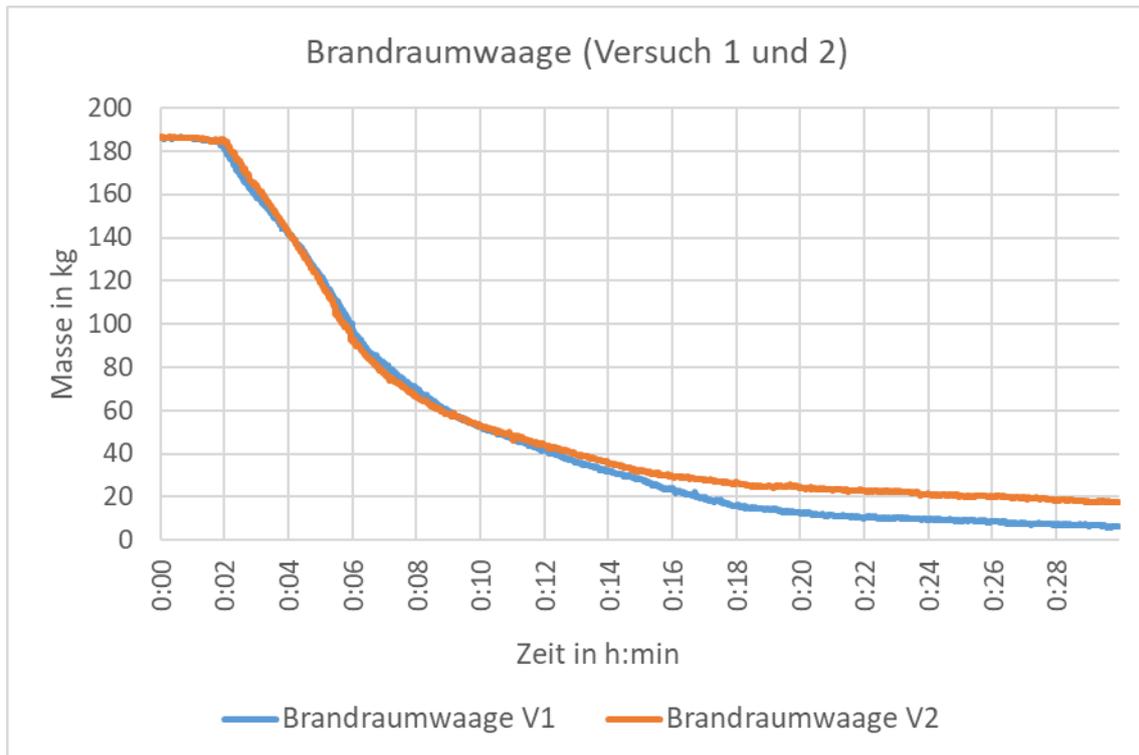


Abbildung 56: Vergleich der Brandraumwaage in Versuch 1 und Versuch 2 (Eigene Darstellung, 2022)

Der Druckanstieg im Brandraum ist ein Resultat der aus der Brandlast und den Umgebungsbedingungen resultierenden Wärmefreisetzung. Die Wärmefreisetzung setzt sich unter anderem aus der Massenabnahme zusammen. Bei ähnlicher Massenabnahme (Abbildung 56) sowie ähnlichen mittleren ist eine derartige Druckdifferenz wie in Abbildung 55 nicht möglich.

Die Abweichung in Abbildung 56 ab etwa 11:00 min nach der Entzündung in der Abklingphase des Brandes resultiert aus einer gewissen Messungenauigkeit. Da vor allem die Brandentstehungs- und Vollbrandphase im Zentrum der Betrachtung liegen und diese eine gleiche Steigung bzw. Gewichtsabnahme aufweisen, kann diese Differenz als vernachlässigbar angesehen werden.

Ähnlicher als die im Raum gemessenen Druckverläufe verhält es sich bei den im Fenster befindlichen bidirektionalen Sonden. Die Verläufe beider Sonden verhalten sich ähnlich, einschließlich ihrer Maximalwerte (s. Abbildung 57).

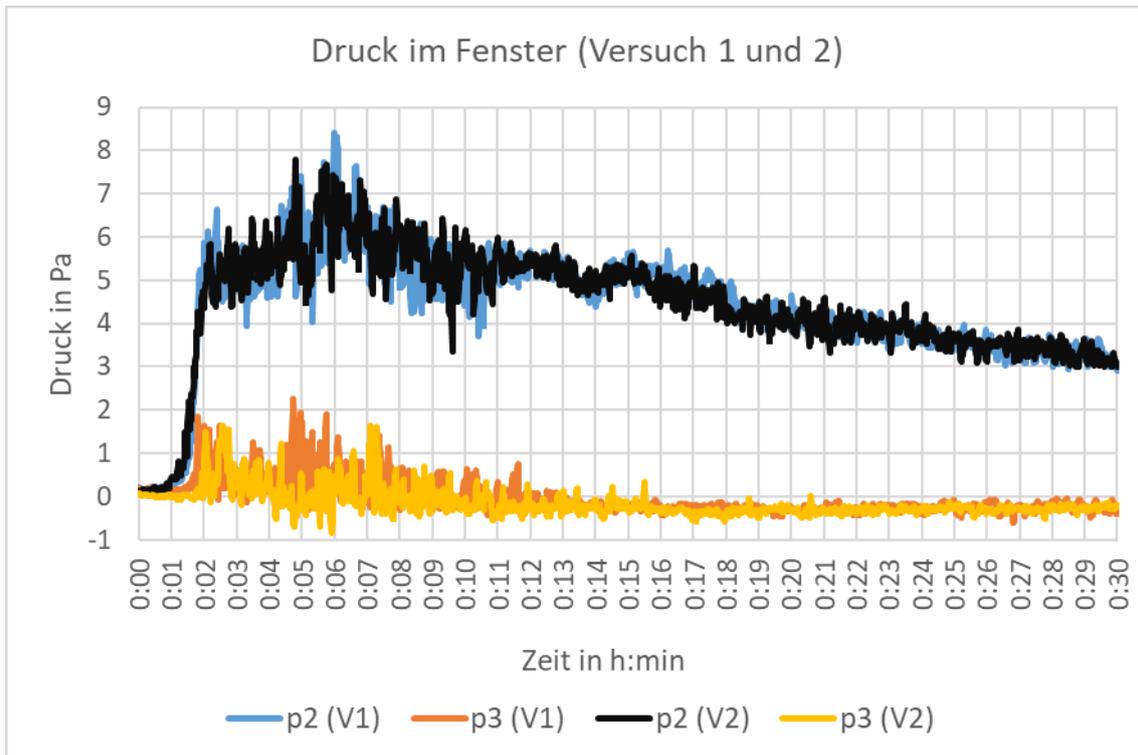


Abbildung 57: Geglättete Druckverläufe im Fenster (Versuch 1 und 2, eigene Darstellung, 2022)

Der Vergleich der Brandversuche 1 und 2 über die Parameter Temperatur und Gas hat gezeigt, dass die arithmetisch gemittelten Temperaturen der Thermoelementketten sowie die im Versuch gemessenen Gaskonzentrationen in weiten Teilen ähnlich und in Teilbereichen annähernd identisch sind. Die geringen Abweichungen werden als vernachlässigbar bezeichnet. Auch die Konzentrationsverläufe der ausgewählten Gase weisen eine ähnliche Entwicklung auf. Die Druckverläufe im Bereich des Fensters sind annähernd identisch und damit auch die Geschwindigkeiten. Der Vergleich der Druckmessungen im Raum ist aufgrund deutlicher Druckschwankungen nur teilweise aussagekräftig und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt. Der Vergleich der Massenabnahme beider Versuche zeigt, dass sich die Verläufe bis zur Abklingphase sehr ähneln, nahezu identisch sind, jedoch unter Berücksichtigung einer gewissen Messungenauigkeit. Um eine allgemeine Aussage über die Reproduzierbarkeit treffen zu können, müssen allerdings weitere Brandversuche unter den gleichen Umständen durchgeführt werden.

5.3 Versuch 3

Der dritte Versuch wurde am 05.10.2021 im Brandraum in der Brandversuchshalle an der FFB durchgeführt. Die Isopropanolwanne unter dem Bett wurde durch einen Mitarbeiter entzündet, im Anschluss wurde die Tür geschlossen. Das Fenster blieb während des Versuchs geschlossen. Die Temperatur im Raum betrug zu Beginn $19\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die wichtigsten Ereignissen während des Versuchs dar.

Tabelle 9: Zeitliche Brandverlaufsdarstellung Versuch 3

Beschreibung	Zeitpunkt	Beurteilungsgrundlage
Zündung Isopropanol	00:00 min	Video
Entzündung Matratze	ca. 00:27 min	Video
Matratze unten Vollbrand	01:00 min	Video
Übergreifen auf oberes Stockbett	01:32 min	Video
Rauchsicht maximal abgesenkt	02:42 min	Video
Durchzündung Bett	18:41 min	Video
Bettdurchzündung beendet, Brand gedrosselt	19:29 min	Video
Flammenbildung auf oberes Stockbett	41:29 min	Video
Zunahme des Brands im Bereich des unteren Betts	41:55 min	Video
Abtropfende Flamme im Bereich des unteren Betts	42:53 min	Video
Flammenübergreif auf oberen Stock des Betts	45:08 min	Video
Durchzündung Bett	45:42 min	Video
Durchzündung Bett beendet, Brand gedrosselt	ca. 49:00	Video
Durchzündung Regal	01:07:55 h	Video
Brand Regal beendet, Raum komplett verrauchte	01:09:22 h	Video
Durchzündung Regal und Bett	01:14:43 h	Video
Brandentstehung neben Schreibtisch	01:16:05 h	Video

Brand stark gedrosselt	ca. 1:18:00 h	Video
Flammen im Deckenbereich	01:23:54 h	Video
Flammen im Bodenbereich am Boden/ an Wandübergangskante	01:23:59 h	Video
Flammenphänomen vom Boden zur Decke im Bettbereich mit Brandzunahme	01:24:25 h	Video
Brandzunahme über gesamte Raumseite (Bett, Regal)	ca. 1:32 h	Video
Kamera defekt	01:39:36 h	Video
Inertisierung HDWN-Anlage	ca. 1:45 h	HDWN

Tabelle 10: Optische Brandverlaufsdarstellung anhand von Kameraaufnahmen innerhalb des Raums in Versuch 3

Abbildung 58 zeigt den Brand 1:00 min nach der Zündung.

- Zündung Matratze



Abbildung 58: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 59 zeigt den Brand 1:50 min nach der Zündung.

1:50 min nach der Zündung:

- Großteil des Betts in Vollbrand (untere Matratze in Vollbrand, Brand geht auf weiteres Stockwerk über)
- Bildung und Absinken der Rauchsicht unter der Decke



Abbildung 59: Brandraum nach 1:50 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 60 zeigt den Brand 2:00 min nach der Zündung.

2:00 min nach der Zündung:

- Im Vgl. zu V1 bei 2:00 min sieht der Brand etwas eingedämmter aus (Brandausbreitung seitlich nicht erkennbar)
- Die Flamme erreicht die Decke



Abbildung 60: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 61 zeigt den Brand 2:30 min nach der Zündung.

2:30 min nach der Zündung im Vergleich zu Abbildung 27 bei offenem Fenster:

- Deutlich weniger Flammenbildung
- Rauchgase sind weiter in Bodennähe
- Deutlich mehr Verrauchung durch fehlende Ventilationsöffnung



Abbildung 61: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 62 zeigt den Brand 8:00 min nach der Zündung.

8:00 min nach der Zündung:

- Raum nahezu vollständig verraucht

- Eine kleine Flamme in Bodennähe wird aufrechterhalten
→ Grund hierfür sind die Undichtigkeiten in Bodennähe



Abbildung 62: Brandraum nach 8:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 63 zeigt den Brand 18:45 min nach der Zündung.

18:45 min nach der Zündung:

- Durchzündung, die Reste des Betts fangen an zu brennen
- Nicht genügend Verbrennungsluft für eine seitliche Brandausbreitung
- Lokal ist ausreichend Luft für die Verbrennung vorhanden, global ist der Raum jedoch stark verrauchet



Abbildung 63: Brandraum nach 18:45 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 64 zeigt den Brand 19:30 min nach der Zündung.

19:30 min nach der Zündung:

- Der Sauerstoff ist verbraucht
→ Brand geht wieder aus



Abbildung 64: Brandraum nach 19:30 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 65 zeigt den Brand 41:36 min nach der Zündung.

41:36 min nach der Zündung:

- Erste Flammenbildung auf dem Regal



Abbildung 65: Brandraum nach 41:36 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 66 zeigt den Brand 46:00 min nach der Zündung.

46:00 min nach der Zündung:

- Erneute Flammenbildung
- Erste Anzeichen von einer Brandausbreitung



Abbildung 66: Brandraum nach 46:00 min (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Abbildung 67 zeigt den Brand 1:09 h nach der Zündung.

1:09 h nach der Zündung:

- Regal brennt



Abbildung 67: Brandraum nach 1:09 h (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Ca 1:45 nach der Zündung:

- (Mehrfache) Inertisierung mittels HDWN-Anlage

Abbildung 68 zeigt den Brandraum nach dem Versuch

Nach dem Brandversuch:

- Wände sind an Stellen mit Flammenkontakt zuvor sauber gebrannt
- Großteil des Raumes ist verrußt
- Im Vergleich zu V1 und V2 mehr Brandlast (Asche) übrig



Abbildung 68: Brandraum nach dem Versuch (Versuch 3, eigene Darstellung, 2021)

Im folgenden Diagramm (Abbildung 69) ist der Temperaturverlauf der Thermokette 4 direkt am Doppelstockbett im Detail zu sehen sowie, als Vergleichsdarstellung, die drei weiteren im Raum angebrachten Thermoketten TK 1 – TK 3 (Abbildung 70 bis Abbildung 72). Zur besseren Übersicht werden die Temperaturverläufe in Verbindung mit den Gaskonzentrationsmessungen betrachtet. Da die Temperaturentwicklung im Raum ab dem frühzeitig eintretenden unterventilierten Zustand von der zur Verfügung stehenden Verbrennungsluft abhängt, ist eine getrennte Darstellung nicht sinnvoll.

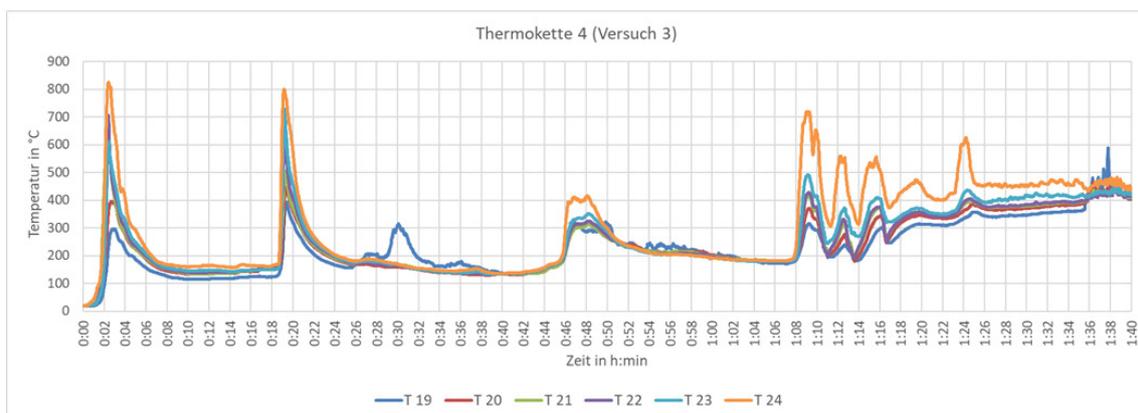


Abbildung 69: Thermokette 4 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

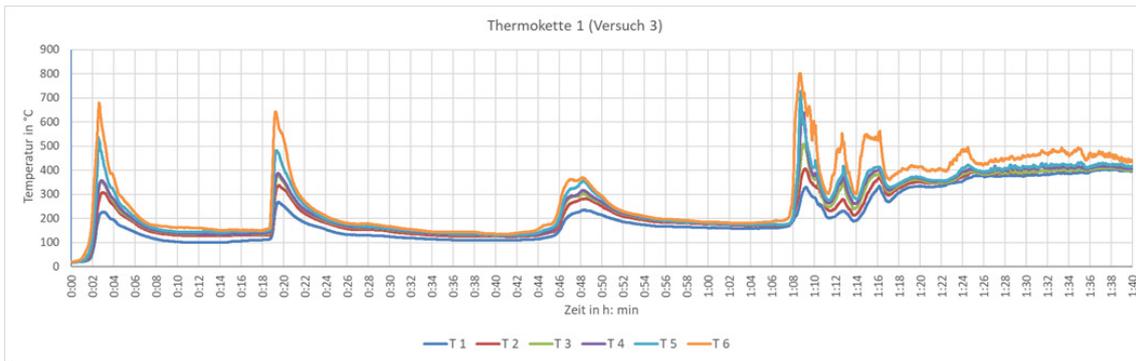


Abbildung 70: Thermokette 1 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

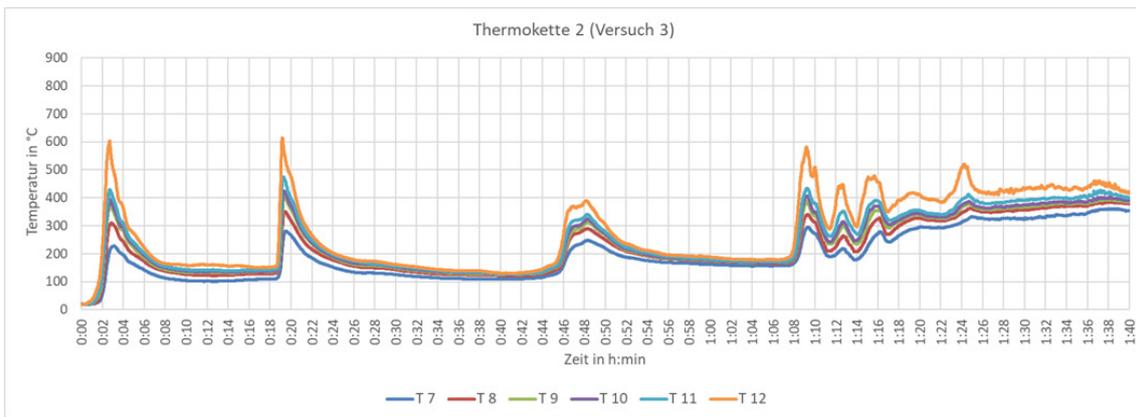


Abbildung 71: Thermokette 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

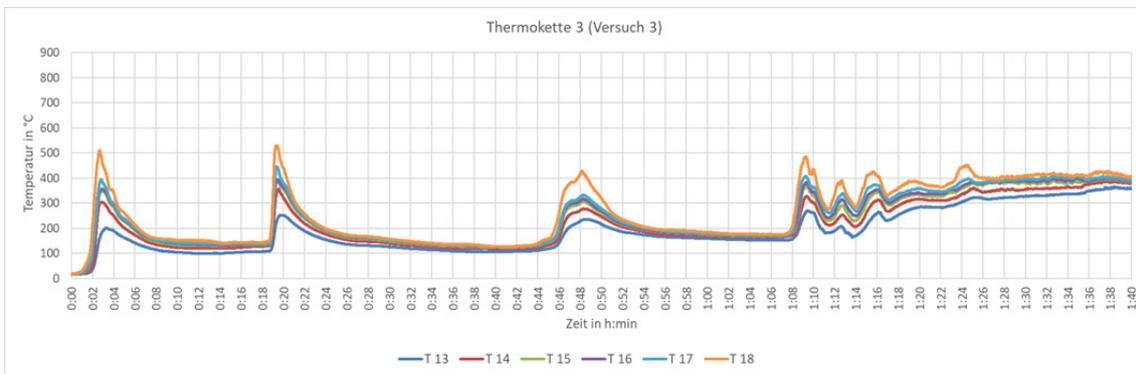


Abbildung 72: Thermokette 3 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

Im Folgenden sind die beiden Diagramme der unteren Sonde und teils oberen Sonde zu sehen.

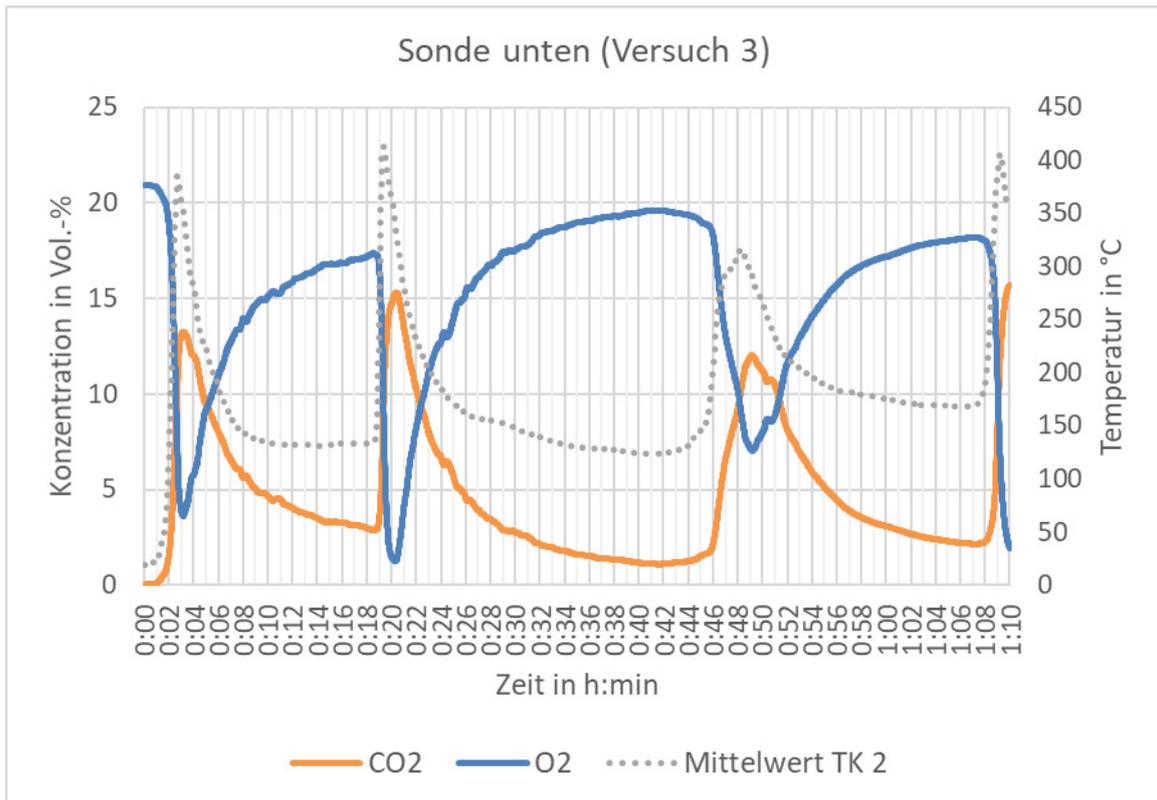


Abbildung 73: Sonde unten O₂ und CO₂ (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

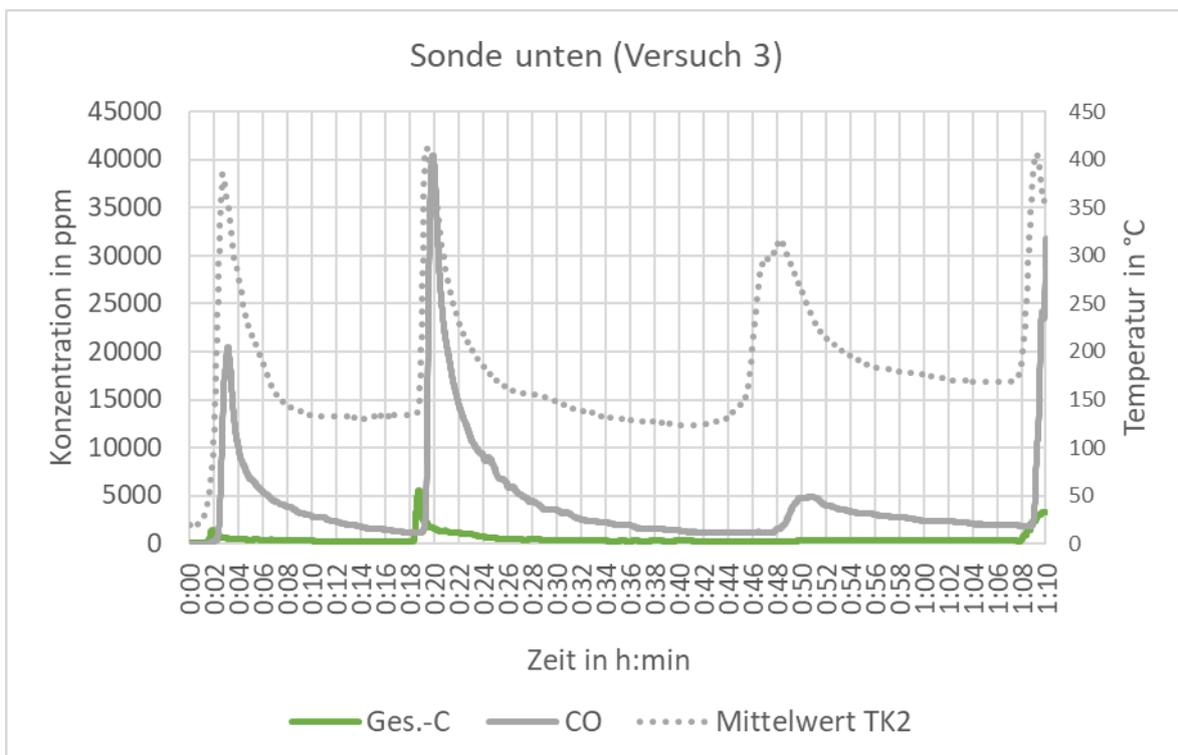


Abbildung 74: Sonde unten (CO) und oben (Ges.-C) (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 73 zeigt die Messergebnisse von O₂ und CO₂ der unteren Sonde. Im Diagramm (Abbildung 74) ist zu sehen, dass die CO-Konzentration beim zweiten Peak

stark ansteigt und bis zu 40.000 ppm erreicht. Damit ist die gemessene Konzentration deutlich höher als beispielsweise bei Versuch 1 mit 23.000 ppm. Beim dritten Peak ist nur eine leichte Erhöhung bis ca. 5.000 ppm erkennbar.

Die Ergebnisse der verfahrbaren Sonde unterscheiden sich nicht von den anderen Konzentrationen. Durch die Verfahrbarkeit wird aber die Schichtung des Sauerstoffs ersichtlich, die Sauerstoffkonzentration auf 1,5 m Höhe ist ca. 2 - 3 Vol.-% höher als 50 cm über dem Boden.

Abbildung 74 stellt die Verläufe der CO und Gesamt C Konzentrationen während des Versuchs dar.

Die HCN-Konzentration wurde diskontinuierlich gemessen. Bei einer 1:09 h langen Probenentnahme betrug die Massenkonzentration $10,6 \text{ mg/m}^3$. Die gemessene HCN-Massenkonzentration ist im Vergleich zu Versuch 1 ($28,7 \text{ mg/m}^3$) geringer. Gründe für die geringere Emission ist die geringere/niedrigere Brandintensität einhergehend mit den Verlöschungen.

Während der Versuchsplanung war nicht vorhersehbar, dass durch Undichtigkeiten die aufgezeigte Menge Sauerstoff in den Raum einströmen würde. Ziel war es, das Feuer durch den Mangel an Sauerstoff zum Erlöschen zu bringen. Bei nicht auszuschließenden Undichtigkeiten des Raumes wurde erwartet, dass der Brand nach dem ersten Peak mit geringer Intensität weiterbrennt und sich ein Gleichgewicht mit dem Sauerstoff einstellt. Allerdings zeigte sich ein unerwartetes Phänomen. Der Sauerstoff sammelte sich im Raum und es kam nach einer gewissen Zeit zu mehreren Durchzündungen.

Abbrand

Abbildung 75 stellt die Massenabnahme über die Zeit unter Berücksichtigung der mittleren Temperaturen der mittig im Raum befindlichen Thermokette 2 dar.

Abbildung 75 zeigt, dass die Massenabnahme verhältnismäßig langsam verläuft im Vergleich zur Abnahme in Versuch 1 (Abbildung 39). Die Temperaturpeaks spiegeln sich alle in der Massenabnahme wieder. 1:15 h nach Versuchsbeginn stellt sich eine Phase mit höheren Temperaturen im Raum ein, in diesem Abschnitt ist die Abnahme mit etwa 50 kg in einer halben Stunde am größten.

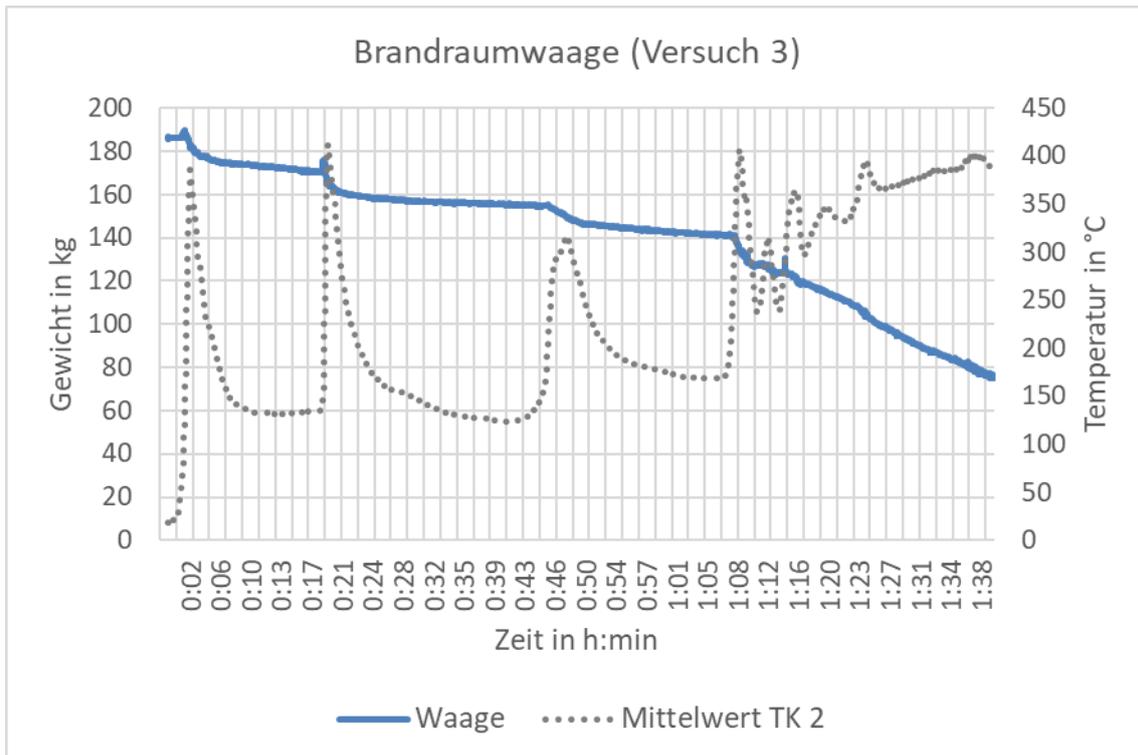


Abbildung 75: Brandraumwaage und mittlerer Temperaturverlauf von TK 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

Druck

Abbildung 76 zeigt den Druckverlauf über die Zeit. Die mittlere Temperatur der Thermokette 2 ist über die Sekundär-Y-Achse aufgetragen. Es wird ein Maximaldruck von bis zu 25 Pa erreicht und nach den Temperatur- und Druckpeaks stellen sich in den Übergangsphasen Drücke im Bereich von etwa 8 bis 10 Pa ein. Der Maximaldruck ist trotz der geschlossenen Ventilationsöffnung ähnlich zu Versuch 1, der auch im Bereich von 25 Pa liegt.

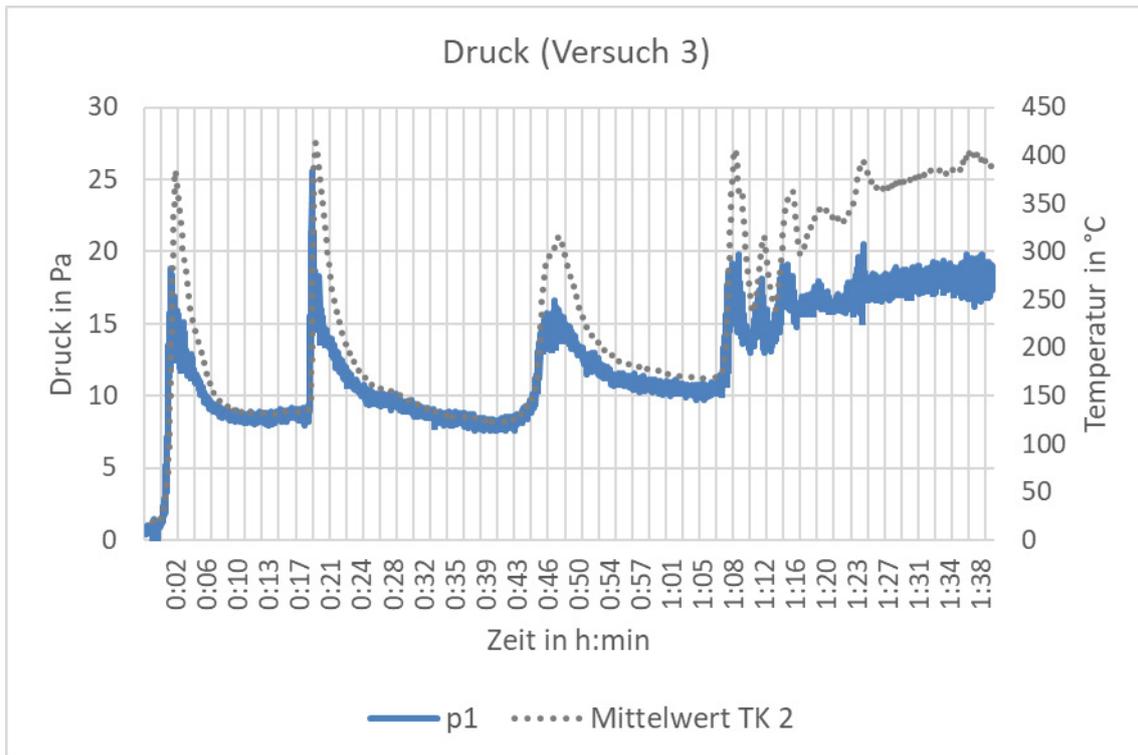


Abbildung 76: Druckverlauf Versuch 3 mit mittlerer Temperatur von TK 2 (Versuch 3, eigene Darstellung, 2022)

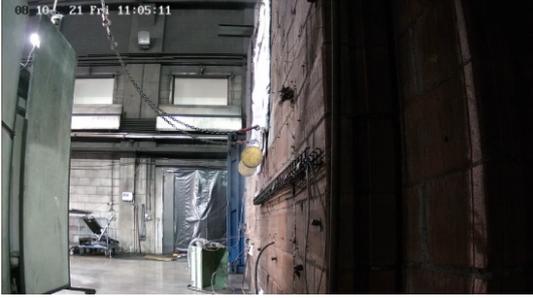
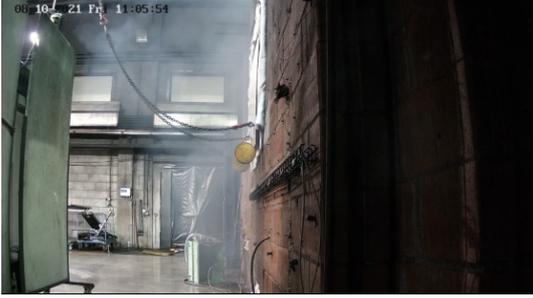
Es zeigt sich, dass, wie zu erwarten, der Druck proportional zur Temperatur ist und sich deshalb alle Anstiege, Abkühlungen und Schwankungen der Temperatur in der Druckmessung abzeichnen.

5.4 Versuch 4

Der vierte Versuch wurde am 08.10.2021 im Brandraum in der Brandversuchshalle an der FFB durchgeführt. Durch die Erkenntnisse aus dem dritten Brandversuch wurde der Boden abgedichtet. Im Laufe des Versuchs zeigte sich, dass dennoch Leckagen vorhanden waren. Die Isopropanolwanne unter dem Bett wurde durch einen Mitarbeiter entzündet, im Anschluss wurde die Tür geschlossen. Zur Veränderung des Verbrennungsregimes wurde die Frischluftzufuhr während des Versuchs durch Öffnen und Schließen des Fensters verändert. Die Temperatur im Raum betrug zu Beginn etwa $17\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Der Brandverlauf vom Versuch 4 ist in der Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Optische Brandverlaufsdarstellung anhand von Kameraaufnahmen innerhalb und außerhalb des Raums in Versuch 4

Kamera innen	Kamera außen
<p>Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen den Brandraum eine Minute nach der Zündung</p> <p><u>1 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Matratze brennt lokal • Bildung von Rauchsicht 	
 <p>Abbildung 77: Brandraum nach 1:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	 <p>Abbildung 78: Brandraumfenster nach 1:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 79 und Abbildung 80 zeigen den Brandraum 1:45 min nach der Zündung</p> <p><u>1:45 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 2. Stock des Betts in Vollbrand • Decke nicht mehr sichtbar • Flammenbeaufschlagung entlang der Decke 	
 <p>Abbildung 79: Brandraum nach 1:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	 <p>Abbildung 80: Brandraumfenster nach 1:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 81 und Abbildung 82 zeigen den Brandraum 2:00 min nach der Zündung</p>	

2:00 min nach der Zündung:

- Feuer wird durch Rauchsicht nach unten gedrückt und gedrosselt
- Bedingt durch die Struktur- sowie Materialeigenschaften der Brandlast (Matratzen) erfolgt die Wärmefreisetzung in den ersten zwei Minuten sehr schnell. Die Verbrennungsluft wird rasch verbraucht.
- Der Raum füllt sich mit Abgasen an, die aber bedingt durch deren Wärmeabgabe an die Umgebung und Wände und globale Verdünnung (N_2) eine geringe (im Mittel) Temperatur aufweisen.



Abbildung 81: Brandraum nach 2:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

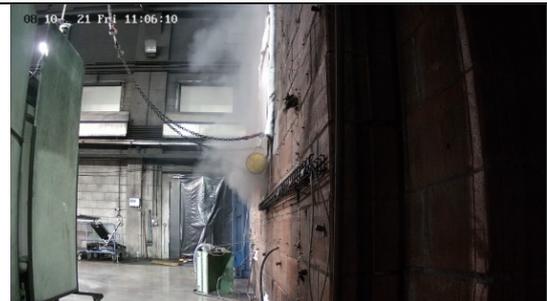


Abbildung 82: Brandraumfenster nach 2:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 83 und Abbildung 84 zeigen den Brandraum 2:30 min nach der Zündung

2:30 min nach der Zündung:

- Rauchsicht bis auf den Boden
- Keine Flammenbildung sichtbar
- Fenster wird geöffnet
- Im Raum herrscht Überdruck (s. Abbildung 113), ca. 39 Pa.
- Rauchgase strömen aus



Abbildung 83: Brandraum nach 2:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

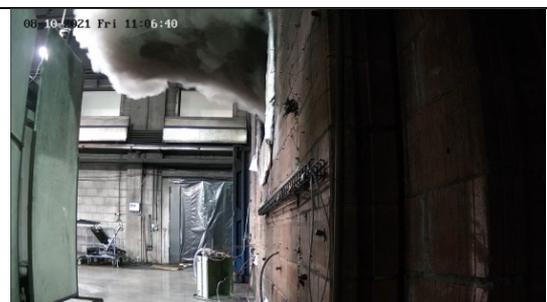


Abbildung 84: Brandraumfenster nach 2:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen den Brandraum 5:00 min nach der Zündung

5:00 min nach der Zündung:

- Rauchsicht bis auf den Boden
- Frischluftzufuhr (Verbrennungsluft) über einen sehr kleinen Spalt unten am Fenster. Frischluft nur im Bodenbereich
- Brand im Bettbereich (im Bodennähe) -> Rauchgase werden produziert
- Rauchgastemperatur steigt
- Nach ausreichender Luftzufuhr und Wärmefreisetzung: Heiße Rauchgase (oberhalb deren Zündtemperatur) strömen aus mit Durchzündungen am Fensterrand (Rollover)



Abbildung 85: Brandraum nach 5:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

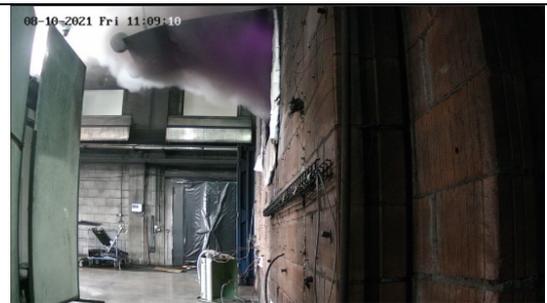


Abbildung 86: Brandraumfenster nach 5:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen den Brandraum 7:40 min nach der Zündung

7:40 min nach der Zündung:

- Keine Sicht im Raum
- Globale Rauchgasdurchzündung nach Frischluftkontakt im Bereich des Fensters
- Fenster wird geschlossen



Abbildung 87: Brandraum nach 7:40 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 88: Brandraumfenster nach 7:40 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 89, Abbildung 90 und Abbildung 91 zeigen den Brandraum 13:22 min nach der Zündung

13:22 min nach der Zündung:

- Brand von Regal und Bettresten
- Fenster wird geöffnet
- Direkt nach der Fensteröffnung wird der Brand beschleunigt
- Alle Temperaturen liegen oberhalb 400°C (500 °C), Die RG-Temperatur liegt oberhalb der Zündtemperatur des Rauchgases.
- Sobald das Fenster geöffnet ist, erfolgt auch Rauchgasdurchzündung (Rollover)
- Bürotisch zündet
- Flammen sind sichtbar
- Vollbrand (Flashover),



Abbildung 89: Brandraum nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 90: Brandraumfenster nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 91: Brandraumfenster frontal nach 13:22 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 92, Abbildung 93 und Abbildung 94 zeigen den Brandraum 13:56 min nach der Zündung

13:56 min nach der Zündung:

- Bürotisch und Stuhl entzünden sich
- Flashover

	
<p>Abbildung 92: Brandraum nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 93: Brandraumfenster nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
	 <p>Abbildung 94: Brandraumfenster frontal nach 13:56 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen den Brandraum 15:15 min nach der Zündung</p> <p><u>15:15 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fenster wird geschlossen 	
	
<p>Abbildung 95: Brandraum nach 15:15 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 96: Brandraumfenster frontal nach 15:15 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen den Brandraum 18:45 min nach der Zündung</p>	

18:45 min nach der Zündung:

- Gehemmter Brand der Möbelreste



Abbildung 97: Brandraum nach 18:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)



Abbildung 98: Brandraumfenster nach 18:45 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen den Brandraum 20:00 min nach der Zündung

20:00 min nach der Zündung:

- Fenster wird geöffnet
- Wenig Rauchentwicklung
- Brandbeschleunigung und -zunahme



Abbildung 99: Brandraum nach 20:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

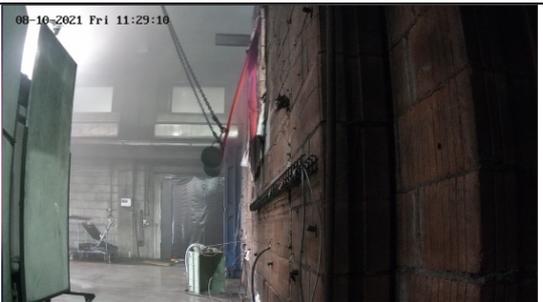


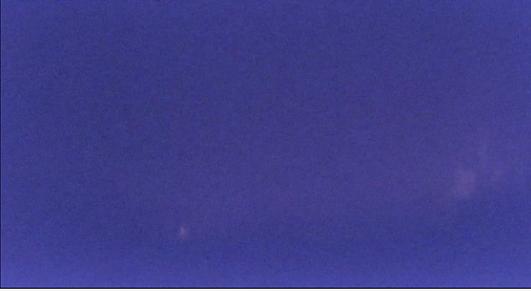
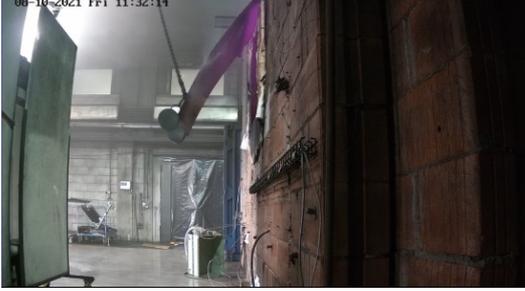
Abbildung 100: Brandraumfenster nach 20:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

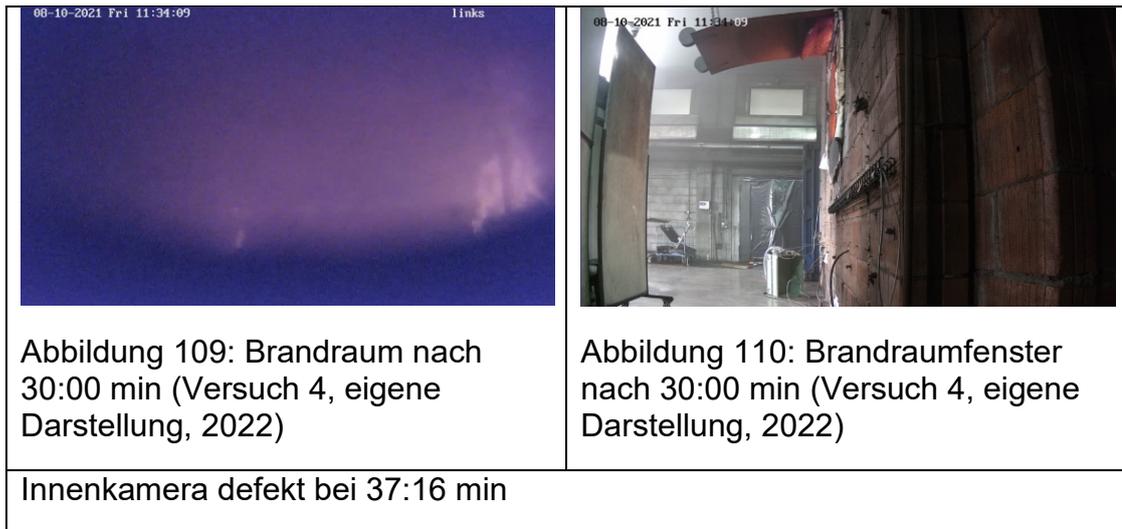
Abbildung 101 und Abbildung 102 zeigen den Brandraum 22:30 min nach der Zündung

22:30 min nach der Zündung:

- Kommode (rechts im Bild) gast stark aus und gerät danach an mehreren Stellen in Brand
- Vollbrand (Reste)
- Normalventilierter Zustand
- Geringe Rauchentwicklung

	
<p>Abbildung 101: Brandraum nach 22:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 102: Brandraumfenster nach 22:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 103 und Abbildung 104 zeigen den Brandraum 25:00 min nach der Zündung</p> <p><u>25:00 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gehemmter Brand der Möbelreste • Fenster wird geschlossen 	
	
<p>Abbildung 103: Brandraum nach 25:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 104: Brandraumfenster nach 25:00 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 105 und Abbildung 106 zeigen den Brandraum 26:30 min nach der Zündung</p> <p><u>26:30 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fenster ist zu • Brand der Kommode wird anschließen eingedämmt 	

	
<p>Abbildung 105: Brandraum nach 26:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 106: Brandraumfenster nach 26:30 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen den Brandraum 28:05 min nach der Zündung</p> <p><u>28:05 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fenster wird geöffnet • Kommode (Reste) brennt weiter 	
	
<p>Abbildung 107: Brandraum nach 28:05 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>	<p>Abbildung 108: Brandraumfenster nach 28:05 min (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)</p>
<p>Abbildung 109 und Abbildung 110 zeigen den Brandraum 30:00 min nach der Zündung</p> <p><u>30:00 min nach der Zündung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Raum brennt aus • Geringe Rauchentwicklung 	



In Abbildung 111 ist der Temperaturverlauf der Thermokette 2 in der Raummitte dargestellt. Der in Tabelle 11 dargestellte Versuchsablauf zeichnet sich deutlich im Temperaturverlauf ab. In der ersten Phase kommt es zum schnellen Temperaturanstieg, bis der Brand in einen unterventilierten Zustand gerät, in dem auch keine Frischluft über eine Ventilationsöffnung nachgeführt wird. Es kommt zur globalen Temperaturabnahme etwa zwei Minuten nach der Entzündung. In dieser Phase wird die Abdeckung der Ventilationsöffnung entfernt. Frischluft strömt nach und ermöglicht eine Zunahme der Wärmefreisetzung. Etwa 7:40 min nach Versuchsbeginn wird die Ventilationsöffnung verschlossen mit einhergehender Drosselung des Brandes und daraus resultierender Temperaturabnahme. Dieser Vorgang wurde noch drei weitere Male durchgeführt, wobei beim letzten Öffnungsschritt (etwa min. 28:00) die Öffnung nicht mehr geschlossen wurde zum Ausbrennen und Abklingen des Brandes.

Abbildung 112 stellt den Temperaturverlauf in der Nähe des Fensters dar, im Fenster selbst waren in diesem Versuch keine Temperaturmessstellen angebracht. Auffallend ist, dass trotz der lokalen Rauchgasdurchzündungen bis hin zum Rollover ab 2:30 min die Temperaturen im Fensterbereich niedriger sind als in der Raummitte (Abbildung 111). Dies deutet darauf hin, dass die Rauchgasdurchzündungen nur außerhalb des Raumes stattgefunden haben, was durch die Sichtung der Videoaufnahmen nicht eindeutig festgestellt werden konnte.

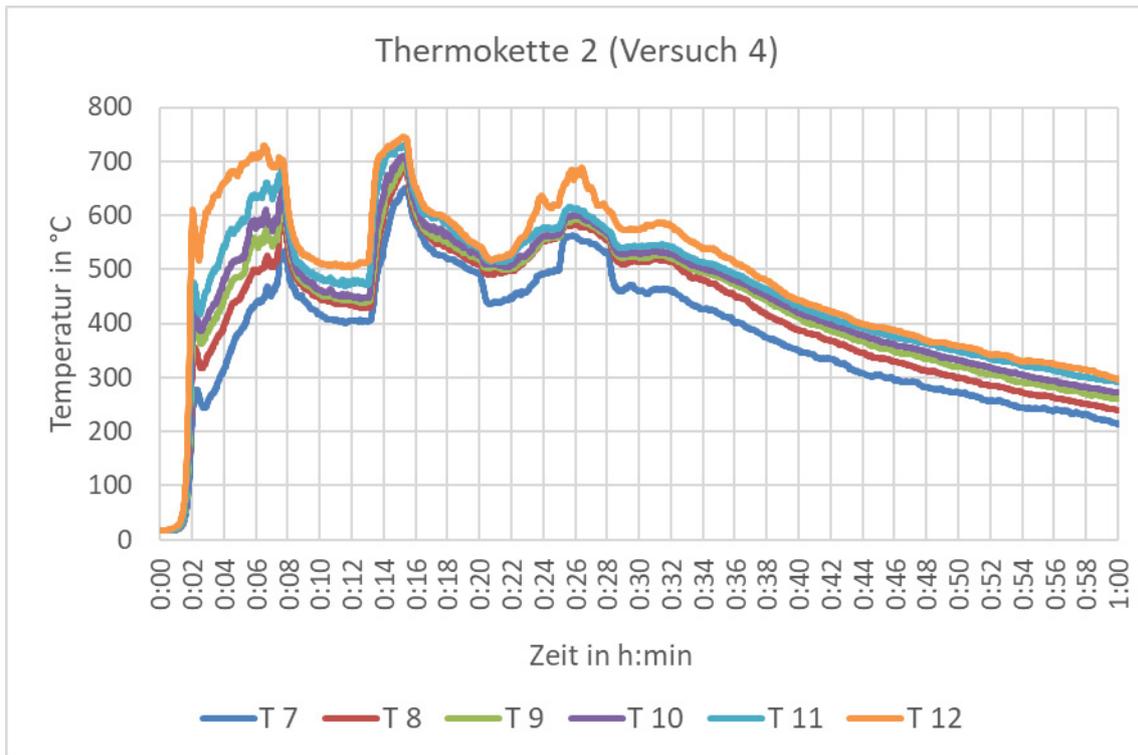


Abbildung 111: Temperaturverlauf TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

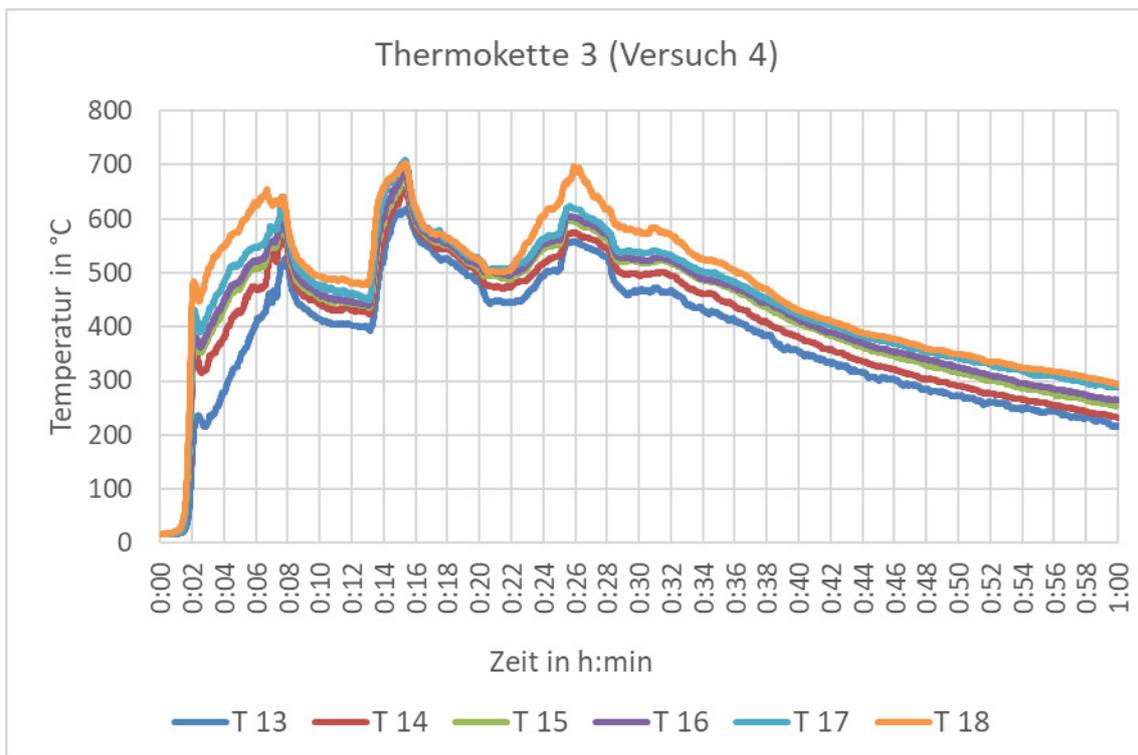


Abbildung 112: Temperaturverlauf TK 3 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Druck

Abbildung 113 stellt den Druckverlauf in Verbindung mit der mittleren Temperatur in der Raummitte (TK 2) über den Messzeitraum von einer Stunde dar. Auffallend ist die

Druckspitze etwa zwei Minuten nach Versuchsbeginn. Obwohl zu diesem Zeitpunkt nicht die höchsten Temperaturen erreicht werden, sorgt die Verbrennung der Matratze und die daraus hervorgehende Gasfreisetzung für einen im Vergleich überproportionalen Druckanstieg. Nach der ersten Öffnung des Fensters entweicht der Druck und es stellt sich ein Druck von etwa 10 Pa ein, was sich auch bei späteren Öffnungen wiederholt. Die Dichtheit des Raums zeigt sich durch die langsame Druckabnahme in Phasen der Temperaturabnahme. Im Vergleich zu Versuch 3 ist der Brandraum messbar dichter. In Versuch 3 kommt es zwar ebenso zu Druckspitzen von 20 bis maximal 25 Pa, trotz der geschlossenen Ventilationsöffnung fällt der Druck jedoch in den Übergangsphasen zwischen den Durchzündungen auf etwa 8 bis 10 Pa ab. Nach den vier Druckanstiegen aufgrund der geschlossenen Ventilationsöffnung kommt es etwa nach 28 min bei entfernter Öffnungsklappe zum Abklingen des Brandes mit Druckabnahme.

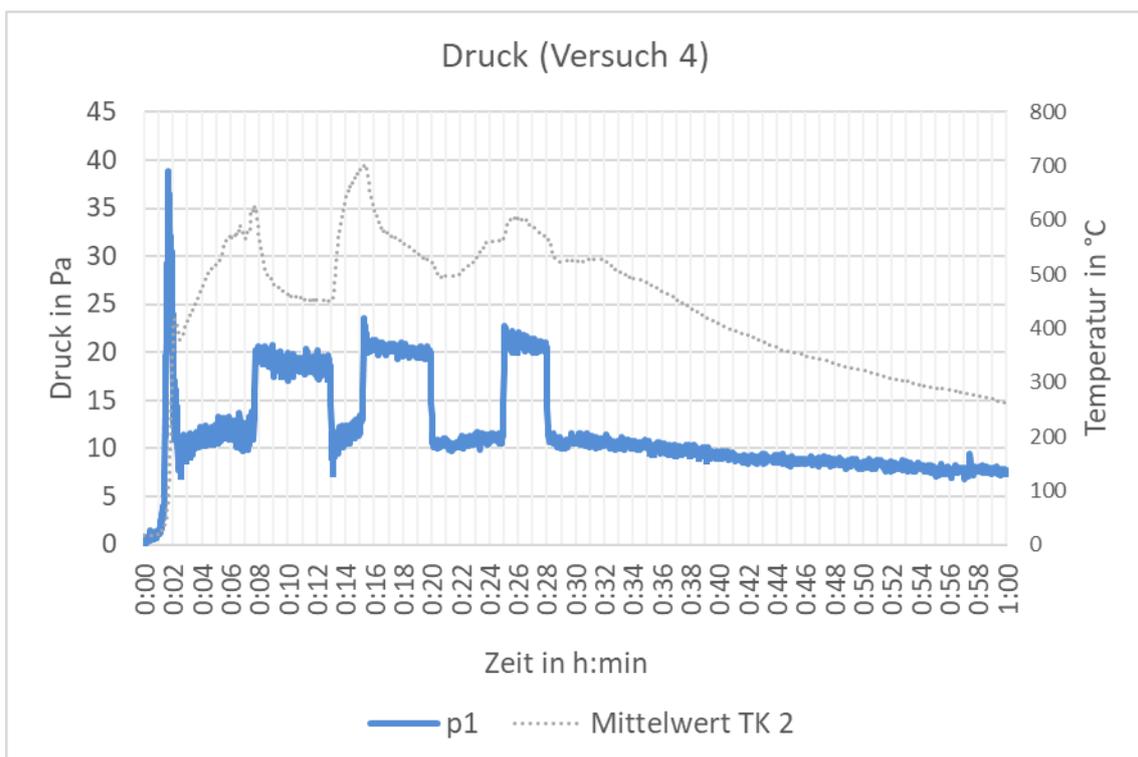


Abbildung 113: Druckverlauf (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Abgas

Abbildung 114 und Abbildung 115 stellen die gemessenen Gaskonzentrationen im oberen Bereich vor dem Fenster dar. Ein Zusammenhang des mittleren Temperaturverlaufs von TK 2 mit den Konzentrationsverläufen zeichnet sich ab, besonders beim Konzentrationsverlauf von CO, CO₂ und O₂. Die Gesamt-C

Konzentration erreicht einen Höchstwert beim ersten Temperaturpeak (Fenster geschlossen) mit über 12.000 ppm. Die CO-Konzentration steigt im gleichen Temperaturpeak auf fast 10.000 ppm an. Der Ges.-C-Peak ist versetzt zum CO₂-Peak.

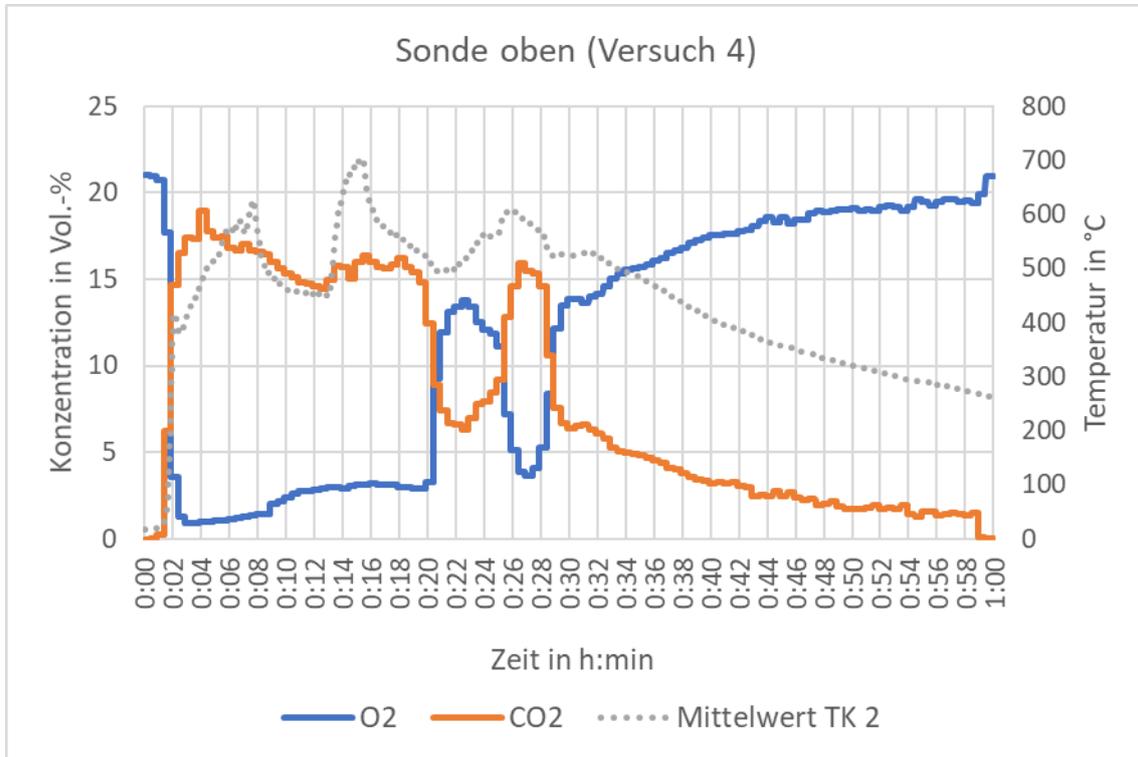


Abbildung 114: Sonde oben O₂, CO₂ und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

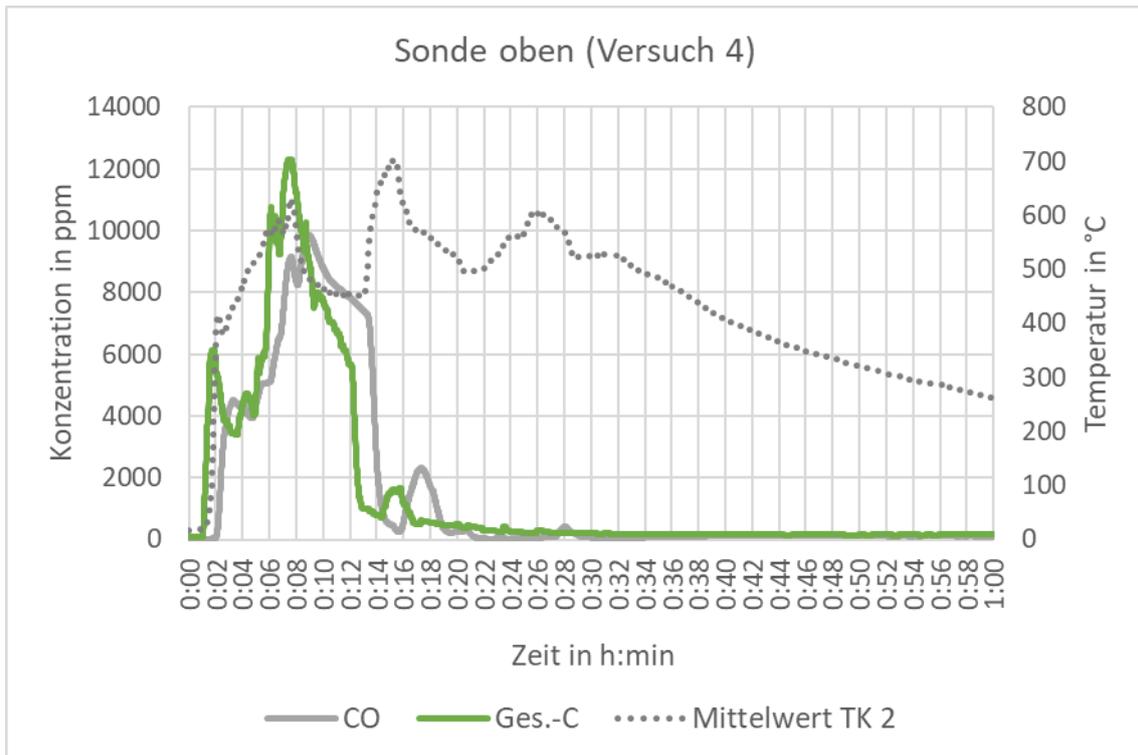


Abbildung 115: Sonde oben CO, Ges.- C und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Die hohen Temperaturen führen zu einer verstärkten Bildung von Pyrolysegasen, welche jedoch von min 8:00 bis min 12:00 konstant abnehmen durch Undichtigkeiten im Bereich des Daches, aber auch durch nachströmenden Sauerstoff und der damit einhergehenden verstärkten Verbrennungsreaktion. Nach der letzten Öffnung des Brandraumfensters etwa 28:00 min nach der Zündung geht der Raum in einen normalventilierten Zustand über und brennt aus, was sich auch in den Gasmessungen abzeichnet.

Abbildung 116 und Abbildung 117 und zeigen die gemessenen Gaskonzentrationen im unteren Bereich vor dem Fenster.

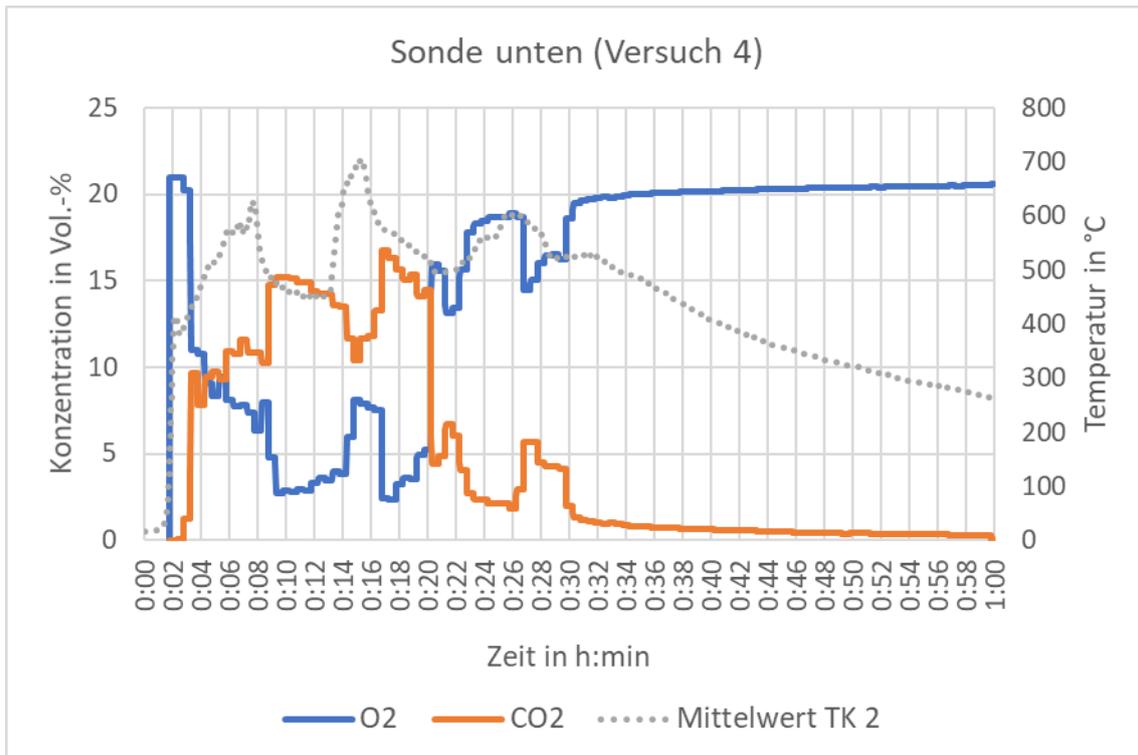


Abbildung 116: Sonde unten O₂, CO₂ und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

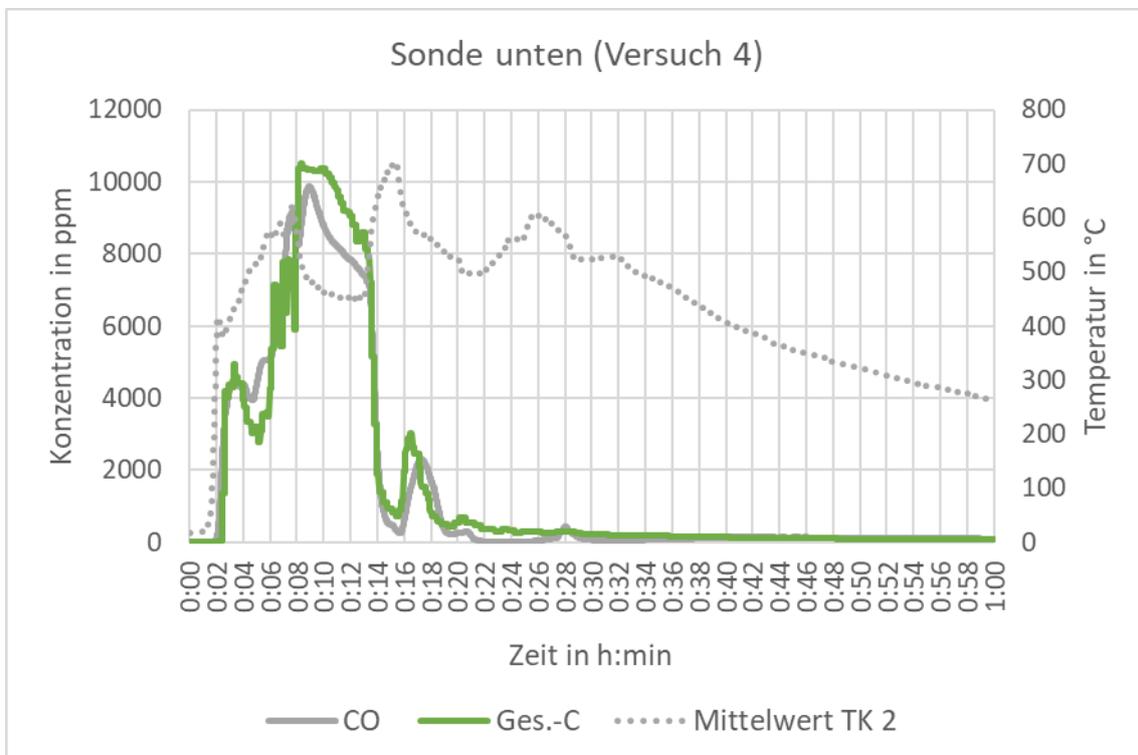


Abbildung 117: Sonde unten CO, Ges.-C und Mittelwert TK 2 (Versuch 4, eigene Darstellung, 2022)

Die HCN-Konzentration wurde diskontinuierlich gemessen. Bei einer 40 min langen Probenentnahme betrug die Massenkonzentration 36,2 mg/m³.

So wie geplant wurde durch gezieltes Öffnen und Schließen des Brandraumfensters eine Änderung des Brandregimes bewirkt. Dadurch konnten im Versuch 4 sowohl alle Phänomene der ventilerten und der unterventilerten Brandführung quantifiziert und dokumentiert werden als auch die dazugehörigen Brandparameter, wie Temperatur, Druck und Abgaskonzentrationen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungsbericht wurde der Einfluss von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen auf einem Brand untersucht. Hauptfragestellungen waren dabei neben der Änderung des Brandregimes (ventiliert - unterventiliert) auch die Abhängigkeit ausgewählter Schadstoffemissionen von den Belüftungsbedingungen sowie die Sauerstoffgrenzwerte und Temperaturen.

An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik am KIT wurden zur Beantwortung der Fragestellungen vier Realbrandversuche durchgeführt. Bei den ersten zwei Versuchen war eine Ventilationsöffnung vorhanden. Der dritte Versuch wurde ohne Ventilationsöffnung durchgeführt. Im vierten Versuch wurden die Ventilationsbedingungen während des Ablaufs verändert.

Der 25 m² große und 2,70 m hohe Brandraum befindet sich in der Brandversuchshalle der FFB in Karlsruhe. Der Versuchsraum dient der realitätsnahen Durchführung von Raumbränden. Als Ventilationsöffnung verfügt der Brandraum über ein 1,0 m x 1,0 m großes Fenster und eine 2,35 m x 0,96 m große Tür. Die Tür blieb bei allen Versuchen geschlossen, nur die Fensteröffnung diente zur Einstellung der Ventilationsbedingungen. Um das Fenster beim dritten und vierten Versuch verschließen und öffnen zu können, wurde vor der Öffnung eine verstellbare Metallplatte installiert. Für die Versuche wurde der Raum in Nachbildung eines Kinderzimmers eingerichtet. Aufgrund des Anspruchs an die Nachprüfung der Reproduzierbarkeit wurden preiswerte und weit verbreitete Einrichtungsgegenstände moderner Bauart verwendet. Diese standen in vierfacher, identischer Ausführung zur Verfügung. Wie in *Kapitel 2 Literaturrecherche* beschrieben, zeichnen sich moderne Möbel unter anderem durch einen erhöhten Spanplatten- und Kunststoffanteil aus. Dies kann im Vergleich zu älterem Mobiliar robusterer Bauart zu einer schnelleren Brandentwicklung und zu einer erhöhten CO- und HCN-Entstehung führen.

Um den Einfluss der Ventilationsbedingungen zu beurteilen, wurden die wichtigsten Brandkenngrößen (Temperatur, Druck und ausgewählte Gase (O₂, CO₂, CO, Ges.-C, HCN)) während jedes Versuchs gemessen.

Um die Temperaturverläufe bei der unterschiedlichen Brandführung zu analysieren, stellt Abbildung 118 den Verlauf der gemittelten Temperatur der Thermokette TK2 (Raummitte) bei V1 (ventiliert), V3 (unterventiliert) und V4 (vent./untervent.) dar.

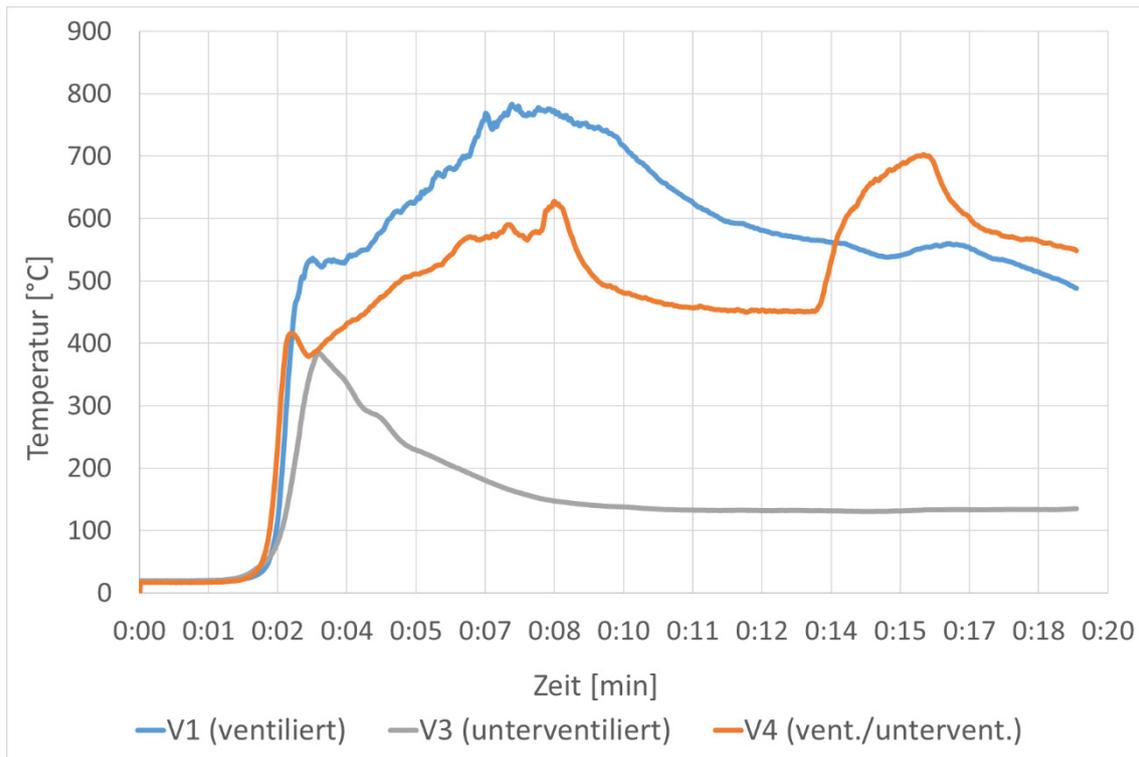


Abbildung 118: Vergleich der mittleren Temperatur (TK2) beim Versuch 1, 3 und 4

Der Verlauf der Temperatur beim Versuch 1 ist für einen ventilierten Brand repräsentativ. Festzuhalten ist, dass der Brand hier als nicht gut ventiliert angenommen werden kann, da nur eine Ventilationsöffnung (Fenster) vorhanden war. Dies wird ersichtlich durch die Bildung eines Temperatur-Plateaus nach etwa zwei Minuten. Der im Raum vorhandene Luftsauerstoff wird durch die Verbrennung umgesetzt und verbraucht. Durch die Wärme- und Rauchgasfreisetzung kommt es zu einer Verdrängung des in den Raum einströmenden Luftsauerstoffs im Bereich der Ventilationsöffnung. Daraus resultiert eine kurze Unterventilation des Brandes, welcher in seiner Intensität und Ausbreitungsgeschwindigkeit eingeschränkt wird. Diese Schwächung bewirkt nach etwa 3 Minuten ein Gleichgewicht zwischen der eintretenden Frischluft- und den austretenden Rauchgasströmen. Die heißen Rauchgase im Raum haben mittlerweile eine Temperatur oberhalb ihrer Zündgrenze erreicht. Sobald ein Kontakt mit Umgebungsluft stattfindet (vor allem im Fensterbereich), kommt es zur Zündung bzw. zu Regionen, in denen Rauchgase zünden. Dieses Phänomen kann als Rollover angenommen werden. Kurze Zeit danach, etwa bei 7:20 min findet ein Flashover statt und der Raum steht im Vollbrand. Dies ist auch der Übergang zwischen ventilations- und brandlastgesteuertem Brand.

In dieser Phase, nach der Brandbeschleunigung durch Frischluftzufuhr (aber auch durch das erreichte Gleichgewicht), wurden auch die maximalen Temperaturen beim Versuch 1 gemessen.

Anders verhält sich die mittlere Temperatur beim Versuch ohne Ventilationsöffnung (V3). Erkennbar ist, dass die Wärmefreisetzung durch die fehlende Frischluftzufuhr etwas langsamer und gedämmt ist und der Brand nach etwa 5 Minuten aufgrund von Sauerstoffmangel nahezu verlischt. Es wurde eine kleine Flammenbildung am Boden beobachtet. Grund dafür waren Undichtigkeiten im Raum, die vor Versuch 4 behoben wurden. Bei diesem Versuch wurden die niedrigsten maximalen Verbrennungstemperaturen gemessen (s. Tabelle 12).

Durch die Installation einer beweglichen Metallplatte an der Fensteröffnung wurde beim Versuch 4 eine gezielte Steuerung der Ventilationszustände im Brandraum ermöglicht. Während des Versuchs wurde mehrmals die Brandventilation verändert. Ziel war, Brandphänomene wie die Branderstickung (aufgrund Luftmangels), Rauchgasdurchzündung und den Flashover gezielt während eines Brandverlaufs zu steuern. Ersichtlich wird das auch beim Temperaturverlauf in Abbildung 118. Da der Brand bei geschlossener Ventilationsöffnung gestartet wurde, beobachtete man direkt nach der Zündung einen zum V3 ähnlichen Temperaturverlauf. Der steilere Gradient ist durch das Beheben der Undichtigkeiten bedingt. Aufgrund der Struktur- sowie Materialeigenschaften der Brandlast (Matratzen) erfolgt die Wärmefreisetzung in den ersten zwei Minuten sehr schnell. Die Verbrennungsluft wird rasch verbraucht und die Flammen werden durch die Rauchsicht nach unten gedrückt und gedrosselt. Nach 2:30 Minuten hat die Rauchsicht den Boden erreicht und es ist keine Flammenbildung mehr sichtbar. An dieser Stelle wurden zum ersten Mal während V4 die Ventilationsbedingungen geändert. Im Raum herrschte ein Überdruck von ca. 39 Pa und die Rauchgase strömten aus. Zu diesem Zeitpunkt war der Raum voller Abgase, die aber bedingt durch die eigene Wärmeabgabe an die Umgebung und Wände und globale Verdünnung (N_2) (im Mittel) eine geringe Temperatur aufwiesen. Diese lag unterhalb ihrer Zündtemperatur (s. Tabelle 2). Eine Rauchgas-durchzündung kann somit nicht stattfinden. Nach ausreichender Luftzufuhr steigt die Wärmefreisetzung wieder (s. Abbildung 118 4 – 8 Min.). Es werden heiße Rauchgase produziert, so steigt auch die globale Abgastemperatur. Nach dem die Rauchgase die eigene Zündtemperatur überschreiten, kommt es vorerst am Fensterrand zu

Durchzündungen (Rollover). Nach ca. 8 Minuten wurde die Fensteröffnung wieder geschlossen. So kann sich das Raumvolumen durch das Brandgeschehen weiter aufheizen. Global herrschen Temperaturen im Raum zwischen 450°C und 600°C. Bei diesen Temperaturen sind die meisten Abgaskomponenten mittlerweile oberhalb der eigenen Zündtemperatur (s. Tabelle 2). Bei einer erneuten Änderung des Ventilationszustands erfolgt eine rasche Rauchgasdurchzündung im gesamten Raum. Dies resultiert in eine Beschleunigung der Wärmefreisetzung des Mobiliars und der Raum gerät in die Vollbrandphase (Flashover, s. Abbildung 118 13 – 16 Min.).

Die gemessenen Temperaturverläufe bei Versuch 1, 3 und 4 korrelieren direkt mit anderen wichtigen Brandparametern wie dem Druck im Raum, dem Sauerstoffgehalt und den Schadstoffkonzentrationen. Deren Maximal- sowie Minimalwerte (O₂) sind in der nachfolgenden Tabelle 12 zusammengefasst. Bei den Messdaten handelt es sich um lokale Werte, die von der Positionierung der Messinstrumente abhängig sind.

Tabelle 12: Maximalwerte der wichtigsten Brandparameter

	V1	V3	V4
T_{max} (in °C)	1089	824	942
P_{maxRaum} (in Pa)	32,5	25,6	38,8
CO_{max} (in ppm)	23.000	47.800	98.700
HCN (mg/m³)	28,7	10,6	36,2
Ges.-C_{max} (in ppm)	9.420	5.538	12.316
O₂_{min} (in Vol.-%)	2,08	2,71	≈0,00

Der maximal erreichte Druck im Raum ist beim Versuch 4 in der unterventilierten Phase höher im Vergleich zu V1 und V2. Das gilt auch für die Schadstoffkonzentrationen. Bei der unterventilierten Brandführung sind die CO-Konzentrationen zwei- bis viermal höher als beim ventilierten Brand. Festzuhalten ist, dass die Maximalwerte des CO und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe beim Übergang zwischen ventilierter und unterventilierter Brandphase erreicht werden. Grund dafür ist der Sauerstoffmangel an der Stelle, der für die unvollständige Oxidation der Edukte maßgeblich ist. Die deutlich niedrigere HCN-Konzentration beim Versuch 3 ist der schwächeren Wärmefreisetzung geschuldet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in dem vorliegenden Forschungsbericht die wichtigsten Ereignisse bei einem ventilierten sowie einem

unterventilierten Brand untersucht und durch messbare Ergebnisse, sowie eine umfassende Videodokumentation (Videoaufnahmen im Brandraum) veranschaulicht werden konnten. Die durchgeführten Brandversuche zeigten eine klare Abhängigkeit wichtiger Brandparameter wie die Temperatur, Druck, Sauerstoff- und Schadstoffkonzentrationen von den Ventilationsbedingungen.

Aus feuerwehrtechnischer Sicht bedeutet das:

Brandverlauf mit Ventilationsöffnung

- Bei einem „ventilierten“ Brandverlauf können auch Phasen auftreten, die einem „unterventilierten“ Brand ähneln. Dies hängt von der Brandlast (z. B. moderne Möbel, die eine deutlich schnellere Wärmefreisetzung aufweisen), dem Raumvolumen (Sauerstoffangebot) und der Ventilationsöffnung (Sauerstoffzufuhr) ab.
- Bei einem „ventilierten“ Brandverlauf entstehen, aufgrund der vorhandenen Oxidationsmittel weniger Schadstoffe (s. Tabelle 12).

Brandverlauf ohne Ventilationsöffnung

- Bei einem unterventilierten Brand ist der Verlauf deutlich komplexer. Sobald die Verbrennungsluft aufgebraucht ist, wird die Intensität und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes eingeschränkt. Die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung (Eigenschaften der Brandlast) am Anfang korreliert direkt mit dem Luftverbrauch, der globalen Abgastemperatur und -zusammensetzung. Bei Sauerstoffmangel gehen die Flammen aus, es kann sein, dass vereinzelt Glutnester weiter vorhanden sind.
- Wichtig bei Wohnungsbränden zum Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr ist die Abgastemperatur (bzw. das Erreichen der Zündtemperatur). Davon hängt ab, ob eine direkte Rauchgasdurchzündung (oder ein Backdraft) sowie nachfolgend ein Flashover stattfindet.
- Die maximalen Temperaturen sind meistens niedriger im Vergleich zu einem ventilierten Brandereignis.
- Bei einem unterventilierten Brand entstehen die meisten Schadstoffe (Pyrolysegase, HCN) in der unterventilierten Phase-, sowie beim Übergang zwischen ventiliert und unterventiliert (CO).

Literaturverzeichnis

- [1] D. Augustin, „Untersuchung des Brandverhaltens unterschiedlichen Mobiliars bei reproduzierbarem Entstehungsbrand im Labormaßstab,“ 2019.
- [2] S. Kaudelka, „Untersuchungen zur Brandentstehung und Brandausbreitung in Wohnungen,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)., 2018.
- [3] A. Coppalle, J. Garo und M. Gaëtan, „Under-Ventilated Compartment Fires: A full-scale Test with wood pallets,“ (1501-1512) Fire safety science-proceedings of the tenth international symposium, 2011.
- [4] D. Brein und J. Kunkelmann, „Feuerwehrtaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 1.,“ (IMK-Forschungsbericht Nr. 154). Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2010.
- [5] C. Knaust, „Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden.,“ Technische Universität Wien, 2009.
- [6] E. Guillaume, F. Didieux, A. Thiry und A. Bellivier, „Real-scale fire tests of one bedroom apartments with regard to tenability assessment,“ Fire Safety Journal. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.014>, 2014.
- [7] D. Gojkovic, „Initial Backdraft Experiments,“ (Report 3121). Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2000.
- [8] P. Z. G. Basmer, „Messung des Giftcocktails bei Bränden,“ Forschungsstelle für Brandschutztechnik des Karlsruher Instituts für Technologie, Karlsruhe, ohne Datum.
- [9] Normenausschuss Feuerwehrwesen, DIN 14011 Begriffe aus dem Feuerwehrwesen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [10] I. Dinkov und D. Max, „Anwendungsbereiche und –grenzen von Ingenieurverfahren bei Nachweisen für die Einhaltung der Anforderungen für die Sicherstellung des abwehrenden Brandschutzes,“ 2017.

- [11] F. Joos, Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen : mit 65 Tabellen, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [12] K. Langeheinecke, A. Kaufmann und K. Langeheinecke, Thermodynamik für Ingenieure, (10. überarb. Aufl.) Wiesbaden: Springer, 2017.
- [13] U. Schneider, T. Hegger, U. Max, F. Mehl, U. Seifert und K.-D. Wathling, Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz, Renningen: expert Verlag, 2007.
- [14] A. Haksever und E. Hagen, Natürlicher Brand, seine Einflußparameter in kleinen und großen Brandräumen, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 1988.
- [15] BRANDSCHUTZ, Das Feuerwehr-Lehrbuch: Grundlagen - Technik - Einsatz, (6. aktualisierte Aufl.) Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2019.
- [16] „GESTIS-Stoffdatenbank,“ ohne Datum. [Online].
- [17] K. Nabert, G. Schön und T. Redeker, Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase und Dämpfe, Deutscher Eichverlag, 2004.
- [18] J. Blumenstock, D. Schelb, J. Kunkelmann und D. Max, „Maßnahmen zur Optimierung der Einsatztaktik bei Bränden in Räumen ohne direkten Zugang ins Freie (IMK Forschungsbericht Nr. 181),“ Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2016.
- [19] H. Bockhorn und D. Trimis, Grundlagen der Verbrennungstechnik., Skript zur Vorlesung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2016.
- [20] M. Ebner, Cyanwasserstoff, ABC-GEFAHREN.de. Abgerufen am 23.06.2022 unter <https://www.abc-gefahren.de>, 2015.
- [21] C. Emrich, Taktische Ventilation, Reihe: Einsatzpraxis, Landsberg am Lech: ecomed Sicherheit, 2012.

- [22] J. Kunkelmann, Forschungsbericht 130: Flashover/Backdraft - Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2003.
- [23] M. A. Wieder, C. Smith und C. Brackage, Essentials of Fire Fighting, Fire Protection Publications, Oklahoma State University, 1992.
- [24] J. Kunkelmann, Forschungsbericht 164: Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise, Teil 2, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2013.
- [25] D. T. Gottuk, M. J. Peatross, J. P. Farely und F. W. Williams, The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study, Fire Safety Journal, Volume 33, 1999.
- [26] S. Busenius, Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Stuttgart, Berlin, Köln: W. Kohlhammer GmbH, 1996.
- [27] J. Warnatz, U. Maas und R. W. Dibble, Verbrennung – Physikalisch – Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung, Springer Verlag, 2001.
- [28] D. Drysdale, An introduction to fire dynamics, 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [29] G. Pless, Die Entwicklung von Kohlenmonoxid bei Bränden in Räumen, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2007.
- [30] I. Dinkov, Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Verbrennung in radial durchströmten porösen inerten Medien, Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [31] N. Djordjevic, Flammenstabilisierung durch Verbrennung in festen Schwämmen, Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe: Engler-Bunte-Institut für Verbrennungstechnik, 2011.
- [32] N. Ebersohl, Untersuchung der Wechselwirkung von NO und Ruß in laminaren, rußenden Vormischflammen., Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

Online verfügbar unter <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000045122>, 2014.

- [33] J. Braun, Grundlagenuntersuchungen zu Schadstoffemissionen und Rauchdichte bei Entstehungsbränden im Labor- und Großmaßstab an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2016.
- [34] R. Flagan und J. Seinfeld, Fundamentals of air pollution engineering, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
- [35] G. P. Merker und R. (. Teichmann, Grundlagen Verbrennungsmotoren, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [36] T. Schmiermund, Das Chemiewissen für die Feuerwehr, Berlin: Springer Spektrum, 2019.
- [37] M. Brandt und D. Einhenkel-Arle, „Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2016.
- [38] T. J. Crone und M. Tolstoy, „Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico oil leak,“ Science, 2010.
- [39] H. Starke, „Kalibrierung von bidirektionalen Sonden,“ IdF Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 2009.